

SVEU ILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Igor Gazdek

Zagreb, 2017.

SVEU ILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Doc. dr. sc. Goran Šagi, dipl. ing.

Student:

Igor Gazdek

Zagreb, 2017.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se svom mentoru doc. dr. sc. Goranu Šagiju na povjerenju te prenesenom znanju tijekom studija, a najviše na podršci i korisnim savjetima tijekom izrade ovog rada.

Posebno se zahvaljujem svojim roditeljima Dragutinu i Marici, braćo i Nenadu i Karlu na strpljenju, ali i na financijskoj i moralnoj podršci tijekom 6 godina studiranja.

Također se zahvaljujem djevojci Maji i prijateljima koji su uljepšali moje studentske dane.

Igor Gazdek



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur. broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Igor Gazdek**

Mat. br.: 0035188218

Naslov rada na
hrvatskom jeziku:

Utjecaj parametara vozila na ponašanje vozila u ispitnim procedurama vezanim za upravljivost

Naslov rada na
engleskom jeziku:

Influence of vehicle parameters on vehicle behaviour in handling test procedures

Opis zadatka:

Računalne simulacije danas su nezaobilazne u procesu razvoja vozila, njegovih podsustava i komponenata. Programski paketi za analizu dinamike vozila omogućuju simuliranje uvjeta stvarne vožnje i analizu ponašanja vozila u virtualnom okruženju te omogućuju mijenjanje parametara u cilju pronalaženja željenih performansi. Cilj ovog rada je razmotriti utjecaj osnovnih parametara vozila, parametara ovjesa te konfiguracije pogonskog i upravljačkog sustava na ponašanje vozila u ispitnim procedurama koje se odnose na analizu upravljivosti.

U okviru diplomskog rada potrebno je:

- Napraviti detaljni pregled standardnih ispitnih procedura koje se odnose na upravljivost vozila.
- Prikazati primjere (iz literature) simulacijskih modela za analizu dinamike u ispitnim procedurama vezanim za upravljivost vozila te navesti podatke o složenosti numeričkih modela, podatke o potrebnim parametrima za zadavanje modela i podatke o mogućnostima tih simulacijskih modela.
- Na osnovu dostupne literature odrediti koji su najznačajniji parametri koji utječu na upravljivost vozila, a čiji će se utjecaj na ponašanje vozila analizirati u simulacijama.
- Napraviti detaljni pregled dinamičkih karakteristika koje služe za ocjenu ponašanja vozila.
- Izraditi odgovarajuće modele vozila i ispitnih procedura u programskom paketu CarSim te simulirati nekoliko ispitnih procedura vezanih za analizu upravljivosti vozila.
- Prikazati rezultate simulacija, provesti detaljnu analizu rezultata i donijeti zaključke o utjecaju najznačajnijih parametara na upravljivost vozila.

Pri izradi se treba pridržavati uobičajenih pravila za izradu diplomskoga rada. U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

28. rujna 2017.

Datum predaje rada:

30. studenog 2017.

Predviđeni datum obrane:

6., 7. i 8. prosinca 2017.

Zadatak zadao:

Doc. dr. sc. Goran Šagi

Predsjednica Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA.....	IV
POPIS TABLICA	VII
POPIS OZNAKA.....	IX
SAŽETAK.....	XI
SUMMARY.....	XII
1. UVOD	1
1.1. Steering feel	1
1.2. Sustav upravljanja vozilom	2
1.3. Standardne ispitne procedure	5
1.4. Ispitivanje u otvorenoj i zatvorenoj petlji	7
2. STANDARDNE ISPITNE PROCEDURE	9
2.1. ISO 3888-1:1999 Dvostruka promjena pravca gibanja.....	10
2.2. ISO 3888-2:2011 Izbjegavanje prepreke	11
2.3. ISO 4138:2012 Ponašanje tijekom ustaljene kružne vožnje	12
2.4. ISO 7401:2011 Ispitivanje bo nog prijelaznog odziva.....	14
2.5. ISO 13674-1:2010 Test krivudanjem.....	17
2.6. Kratak pregled ostalih standardnih ispitnih procedura.....	18
2.6.1. ISO 7975:2006 Ko enje u zavoju	19
2.6.2. ISO 9816:2006 Reakcija na prekid dotoka snage u zavoju.....	19
2.6.3. ISO 13674-2:2016 Metoda ispitivanja u otvorenoj petlji za kvantifikaciju upravljanja u središnjoj osi – Prijelazni test.....	19
2.6.4. 17288-1:2011 Ponašanje kod slobodnog upravljanja – Dio 1: Metoda ispitivanja u otvorenoj petlji puštanjem upravlja a	20
2.6.5. ISO 17288-2:2011 Ponašanje kod slobodnog upravljanja – Dio 2: Metoda ispitivanja u otvorenoj petlji skokovitim pobudom upravlja a	20
3. MODELI ZA ANALIZU DINAMIKE I PROGRAMSKI PAKETI	21
3.1. Dinamika vozila	21
3.2. Simulacijski modeli.....	22
3.3. Programski paketi.....	26
3.4. Programski paket CarSim	27
3.4.1. Standardne ispitne procedure u CarSim-u.....	28
4. PARAMETRI KOJI UTJE U NA PONAŠANJE VOZILA	29

4.1. Vozilo.....	30
4.1.1. Me uosovinski razmak	30
4.1.2. Položaj težišta vozila.....	31
4.1.3. Vrste pogona	32
4.1.3.1. Stražnji pogon	32
4.1.3.2. Prednji pogon	33
4.1.3.3. Pogon na sve kota e.....	33
4.2. Osovine i ovjes.....	34
4.2.1. Karakteristike opruga	34
4.3. Kinematika kota a.....	35
4.3.1. Bo ni nagib kota a	35
4.3.2. Uzdužni nagib osi zakretanja kota a i mehani ko predvo enje.....	36
4.4. Sustav upravljanja	38
4.4.1. Upravljanje svih kota a (AWS)	38
5. PRIPREMA MODELA I PROVEDBA SIMULACIJE.....	40
5.1. Priprema modela vozila.....	40
5.2. Priprema standardnih ispitnih procedura	45
5.3. Provedba simulacije	46
6. OBRADA REZULTATA	47
7. REZULTATI SIMULACIJA	48
7.1. Simulacija procedure ISO 3888-1:1999 Dvostruka izmjena pravca.....	48
7.1.1. Provedba simulacije procedure ISO 3888-1:1999.....	48
7.1.2. Odstupanje vozila od zadane putanje	49
7.1.3. Promatrane karakteristike.....	50
7.1.3.1. Bo ni nagib kota a – ISO 3888-1:1999.....	50
7.1.3.2. Uzdužni nagib osi zakretanja kota a – ISO 3888-1:1999.....	51
7.1.3.3. Me uosovinski razmak – ISO 3888-1:1999	53
7.1.3.4. Razmještaj tereta/putnika u vozilu – ISO 3888-1:1999.....	54
7.1.3.5. Upravljanje prednjim/svim kota ima – ISO 3888-1:1999.....	56
7.1.3.6. Krutost opruga – ISO 3888-1:1999	59
7.1.4. Zaklju ak dvostruke izmjene pravca.....	60
7.2. Simulacija procedure ISO 7401:2011 Ispitivanje bo nog prijelaznog odziva.....	61
7.2.1. Provedba simulacije procedure ISO 7401:2011	61
7.2.2. Rezultati simulacije – ISO 7401:2011	63
7.2.2.1. Bo ni nagib kota a – ISO 7401:2011	63

7.2.2.2. Uzdužni nagib osi zakretanja kota a – ISO 7401:2011	64
7.2.2.3. Me uosovinski razmak – ISO 7401:2011	65
7.2.2.4. Razmještaj tereta/putnika u vozilu – ISO 7401:2011	66
7.2.2.5. Upravljanje prednjih/svih kota a – ISO 7401:2011	68
7.2.2.6. Krutost opruga – ISO 7401:2011	69
7.2.2.7. Vrsta pogona – ISO 7401:2011	70
7.2.3. Zaklju ak ispitivanja bo nog prijelaznog odziva	71
7.3. Simulacija procedure ISO 13674-1:2010 Test krivudanjem	72
7.3.1. Provedba simulacije procedure ISO 13674-1:2010	72
7.3.1. Rezultati simulacije – ISO 13674-1:2010	73
7.3.1.1. Bo ni nagib kota a – ISO 13674-1:2010	75
7.3.1.2. Uzdužni nagib osi zakretanja kota a – ISO 13674-1:2010	75
7.3.1.3. Me uosovinski razmak – ISO 13674-1:2010	76
7.3.1.4. Razmještaj tereta/putnika u vozilu – ISO 13674-1:2010	77
7.3.1.5. Upravljanje prednjim / svim kota ima – ISO 13674-1:2010	78
7.3.1.6. Krutost opruga – ISO 13674-1:2010	78
7.3.1.7. Vrsta pogona – ISO 13674-1:2010	79
7.3.2. Zaklju ak testa krivudanja	79
7.4. Utjecaj parametara vozila na upravljivost u standardnim ispitnim procedurama	80
7.5. Simulacija na trka oj stazi	81
8. ZAKLJU AK	83
LITERATURA	84
PRILOZI	86

POPIS SLIKA

Slika 1. Shema osnovnog upravlja kog sustava [4]	2
Slika 2. Shema upravljanja zakretnom osovinom (lijevo), zakretanjem rukavaca kota a (sredina) i upravljanje zakretanjem rukavaca - M1 kategorija (desno) [4]	2
Slika 3. Primjer upravlja kog sustava vozila [5].....	3
Slika 4. Upravlja ki prijenosnik [4]	3
Slika 5. Upravlja ki prijenosnik sa zup astom letvom i hidrauli kim servoure ajem [4]	4
Slika 6. Upravlja ki sustav s elektri kim servoupravljanjem [4].....	4
Slika 7. Ispitivanje u otvorenoj petlji [9].....	7
Slika 8. Izvo enje ispitne procedure ISO 3888-2 [10].....	9
Slika 9. Automobil na poligonu tijekom provedbe procedure dvostruke promjena pravca gibanja [11]	10
Slika 10. Ispitna staza za provedbu procedure dvostruke izmjene pravca [12]	10
Slika 11. Ispitna staza za provedbu procedure izbjegavanja prepreke [15]	12
Slika 12. Primjeri pobuda upravlja a prema [1].....	15
Slika 13. O itavanje rezultata ISO 7401:2011 [18]	16
Slika 14. Prikaz rezultata ispitne procedure ISO 13674-1:2010 [19]	18
Slika 15. Koordinatni sustav vozila prema ISO 8855:2011 [25]	21
Slika 16. Model s jednim tragom kota a [25]	22
Slika 17. Model s dva traga kota a [25].....	23
Slika 18. MBS model vozila iz programskog paketa CarSim.....	24
Slika 19. Usporedba kompleksnosti pojedinih simulacijskih modela.....	24
Slika 20. Model vozila na trka oj stazi s razli itim podlogama [28]	27
Slika 21. Proizvo a i vozila (OEM) koji koriste CarSim [27]	27
Slika 22. Standardne ispitne procedure u CarSim-u	28
Slika 23. Me uosovinski razmak – ISO 612 / DIN 70000 [1].....	30
Slika 24. Promjena me uosovinskog razmaka tijekom hoda kota a [1].....	30
Slika 25. Položaj težišta ovješениh masa B_0 (karoserija vozila) i težišta vozila V prema [7]...	31
Slika 26. VW Transporter, stražnji pogon s motorom postavljenim straga [7].....	32
Slika 27. Pogonski sklop Audi-ja RS5 - stalni pogon na sve kota e [33].....	33
Slika 28. Linearna (lijevo) i progresivna (desno) karakteristika [4]	34
Slika 29. Vrste torzijskih zavojnih opruga [4]	35

Slika 30. Bo ni nagib kota a [1]	35
Slika 31. Pozitivni i negativni bo ni nagib kota a [4]	36
Slika 32. Uzdužni nagib osi kota a i mehani ko predvo enje [1]	36
Slika 33. Pozitivni i negativni uzdužni nagib i mehani ko predvo enje [4].....	37
Slika 34. Upravljanje: a) prednjim kota ima, b) prednjim i stražnjim u suprotnom smjeru, c) prednjim i stražnjim u istom smjeru [31]	38
Slika 35. Pomak središta zakretanja vozila u odnosu na FWS [1]	38
Slika 36. Bo ne sile, upravljanje: a) prednjim i stražnjim u suprotnom smjeru, b) prednjim kota ima, c) prednjim i stražnjim u istom smjeru [1]	39
Slika 37. Krivulje prijenosnih omjera upravljanja svih kota a [1].....	39
Slika 38. SUV vozila [34][35].....	40
Slika 39. Izra ena vozila za potrebe simulacije	40
Slika 40. Položaj težišta i me uosovinski razmak vozila u CarSim-u	41
Slika 41. Razmještaj tereta/putnika u vozilu	43
Slika 42. Smještaj tereta/putnika unutar koordinatnog sustava vozila	43
Slika 43. Postavke vozila s upravljanjem svim kota ima	44
Slika 44. Funkcija promjene kuta zakreta stražnjih u odnosu na prednje kota e.....	45
Slika 45. Kružna trka a staza u programskom paketu CarSim	46
Slika 46. Dijagram toka podataka	47
Slika 47. Dio programskog koda makronaredbe za uvoz podataka	47
Slika 48. Simulacija ispitne procedure ISO 3888-1:1999	48
Slika 49. Utjecaj promjene vrste pogona vozila na putanju vozila kroz ispitnu stazu	48
Slika 50. Utjecaj promjene bo nog nagiba kota a na bo ne sile na kota u	51
Slika 51. Utjecaj promjene uzdužnog nagiba osi zakretanja kota a na odstupanje vozila od zadane putanje	51
Slika 52. Utjecaj promjene uzdužnog nagiba osi zakretanja kota a na kut zakreta upravlja a52	
Slika 53. Utjecaj promjene uzdužnog nagiba osi zakretanja kota a na moment na upravlja u52	
Slika 54. Utjecaj me uosovinskog razmaka na moment na upravlja u	53
Slika 55. Utjecaj me uosovinskog razmaka na podupravljivost / preupravljivost vozila	54
Slika 56. Utjecaj razmještaja tereta/putnika u vozilu kut zakreta vozila oko uzdužne osi.....	55
Slika 57. Utjecaj razmještaja tereta/putnika u vozilu na moment na upravlja u	55
Slika 58. Utjecaj vrste upravljanja na odstupanje vozila od zadane putanje.....	56
Slika 59. Kut zakreta prednjih kota a	56
Slika 60. Kut zakreta stražnjih kota a	57

Slika 61. Utjecaj vrste upravljanja na moment vozila oko vertikalne osi	57
Slika 62. Utjecaj vrste upravljanja na ubrzanje vozila u popre nom smjeru	58
Slika 63. Utjecaj vrste upravljanja na kutnu brzinu oko vertikalne osi.....	58
Slika 64. Utjecaj vrste upravljanja na kut bo nog klizanja vozila	58
Slika 65. Utjecaj krutosti opruge na hod opruga na prednjoj osovini	59
Slika 66. Utjecaj krutosti opruge na hod opruga na stražnjoj osovini.....	59
Slika 67. Utjecaj krutosti opruga na kut zakreta oko uzdužne osi	60
Slika 68. Utjecaj krutosti opruga na podupravljivost/preupravljivost.....	60
Slika 69. Simulacija ispitne procedure ISO 7401:2011	61
Slika 70. Brzina kretanja vozila tijekom provedbe simulacije procedure ISO 7401:2011	61
Slika 71. Kora na pobuda na upravlja u (uzdužni nagib osi zakretanja vozila).....	62
Slika 72. Utjecaj promjene uzdužnog nagiba kota a na ubrzanje vozila u popre nom smjeru kod kora ne pobude upravlja a.....	62
Slika 73. Utjecaj promjene uzdužnog nagiba kota a na kutnu brzinu vozila oko vertikalne osi kod kora ne pobude upravlja a.....	62
Slika 74. Oscilacije ubrzanja u popre nom smjeru pri ustaljenom stanju	66
Slika 75. Simulacija ispitne procedure ISO 13674-1:2010 Test krivudanjem.....	72
Slika 76. Brzina kretanja vozila tijekom provedbe simulacije procedure ISO 13674-1:2010.	72
Slika 77. Primjer rezultata vozila sa sinusoidnom pobudom volana i promjena bo nog ubrzanja i kutne brzine oko vertikalne osi	73
Slika 78. Primjer 1 - histereza za izvorno vozilo	74
Slika 79. Primjer 2 - histereza za izvorno vozilo	74
Slika 80. Vozila A-1 i B-1 u ciljnoj ravnini	81
Slika 81. Definirana trka a staza u izborniku CarSim-a	81
Slika 82. Prevratanje vozila B-2	82

POPIS TABLICA

Tablica 1. Dimenzije ispitne staze – dvostruka izmjena pravca [12].....	10
Tablica 2. Na ini provedbe ispitne procedure ISO 4138:2012 84[17].....	13
Tablica 3. Prikaz rezultata ispitne procedure ISO 13674-1:2010 [19].....	17
Tablica 4. Prikaz rezultata ispitne procedure ISO 13674-2:2016 [22].....	19
Tablica 5. Pregled mogu nosti modela vozila: vrste gibanja, stupnjevi slobode, frekvencijsko podru je [27]	22
Tablica 6. Brzina izvo enja simulacija [27].....	25
Tablica 7. Klasi ni MBD programski paketi (numeri ka formulacija) [25]	26
Tablica 8. Specijalizirani programski paketi za analizu dinamike vozila (simboli na formulacija) [25]	26
Tablica 9. Parametri koji utje u na upravljivost vozila [1]	29
Tablica 10. Vrste opruge i tipovi karakteristika [4]	34
Tablica 11. Rasponi vrijednosti uzdužnog nagiba i mehani kog predvo enja [1]	37
Tablica 12. Koeficijent k [1]	39
Tablica 13. Odabrana vozila.....	42
Tablica 14. Smještaj tereta/putnika unutar koordinatnog sustava vozila	43
Tablica 15. Odstupanje vozila od zadana putanje	49
Tablica 16. Utjecaj promjene bo nog nagiba kota a na bo ne sile na kota u	50
Tablica 17. Standardna devijacija momenta na upravlja u.....	56
Tablica 18. Pomo ne vrijednosti - bo ni nagib kota a	63
Tablica 19. Utjecaj promjene bo nog nagiba kota a na promatrane karakteristike u ispitnoj proceduri ISO 7401:2011	64
Tablica 20. Pomo ne vrijednosti – uzdužni nagib osi zakretanja kota a.....	64
Tablica 21. Utjecaj promjene uzdužnog nagiba osi kota a na promatrane karakteristike u ispitnoj proceduri ISO 7401:2011	65
Tablica 22. Pomo ne vrijednosti – me uosovinski razmak.....	65
Tablica 23. Utjecaj promjene me uosovinskog razmaka na promatrane karakteristike u ispitnoj proceduri ISO 7401:2011	66
Tablica 24. Pomo ne vrijednosti – razmještaj tereta/putnika u vozilu.....	67
Tablica 25. Utjecaj promjene razmještaja tereta/putnika u vozilu na promatrane karakteristike u ispitnoj proceduri ISO 7401:2011	67

Tablica 26. Pomoćne vrijednosti – upravljanje svih kotača.....	68
Tablica 27. Utjecaj upravljanja svih kotača na promatrane karakteristike u ispitnoj proceduri ISO 7401:2011	68
Tablica 28. Pomoćne vrijednosti – krutost opruga.....	69
Tablica 29. Utjecaj promjene krutosti opruga na promatrane karakteristike u ispitnoj proceduri ISO 7401:2011	69
Tablica 30. Pomoćne vrijednosti – vrsta pogona	70
Tablica 31. Utjecaj vrste pogona na promatrane karakteristike u ispitnoj proceduri ISO 7401:2011.....	70
Tablica 32. Utjecaj promjene bočnog nagiba kotača na promatrane karakteristike u ispitnoj proceduri ISO 13674-1:2010.....	75
Tablica 33. . Utjecaj promjene uzdužnog nagiba osi kotača na promatrane karakteristike u ispitnoj proceduri ISO 13674-1:2010.....	76
Tablica 34. Utjecaj promjene međuosovinskog razmaka na promatrane karakteristike u ispitnoj proceduri ISO 13674-1:2010.....	76
Tablica 35. Utjecaj promjene razmještaja tereta/putnika u vozilu na promatrane karakteristike u ispitnoj proceduri ISO 13674-1:2010.....	77
Tablica 36. Utjecaj upravljanja svih kotača na promatrane karakteristike u ispitnoj proceduri ISO 13674-1:2010	78
Tablica 37. Utjecaj promjene krutosti opruga na promatrane karakteristike u ispitnoj proceduri ISO 13674-1:2010	79
Tablica 38. Suma ponašanja parametara u razmatranim ispitnim procedurama.....	80
Tablica 39. Vozila u simulaciji vožnje na trkačkoj stazi.....	82
Tablica 40. Simulacija na trkačkoj stazi – prolazna vremena	82

POPIS OZNAKA

Oznaka	Mjerna jedinica	Opis
h_{B_0}	mm	visina težišta ovješениh masa (karoserija vozila)
h_V	mm	visina težišta vozila
B_0		težište ovješениh masa (karoserija vozila)
F_0	N	sila koja djeluje na oprugu
F_x	N	sila na kota u uzdužnom smjeru, v_u na sila
F_y	N	sila na kota u poprečnom smjeru, b_o na sila
F_z	N	sila na kota u vertikalnom smjeru, sila na podlogu
M_H	Nm	moment na upravljaču
T_9	S	vrijeme odziva
T_m	S	vršno vrijeme odziva
a_x	m/s ²	ubrzanje vozila u uzdužnom smjeru
a_y	m/s ²	ubrzanje vozila u poprečnom smjeru, b_o no ubrzanje
k_p		koeficijent zakretanja stražnjih kotača
r_s	m	polumjer zakretanja kotača
t_0	s	referentno vrijeme (za 50 % pobude upravljača)
v_x	m/s	brzina vozila u uzdužnom smjeru
v_y	m/s	brzina vozila u poprečnom smjeru
α_{f-R}	°	kut bočnog klizanja prednjeg desnog kotača
α_f	°	kut bočnog klizanja prednjih kotača
α_{f-L}	°	kut bočnog klizanja prednjeg lijevog kotača
α_r	°	kut bočnog klizanja stražnjih kotača
α_{r-L}	°	kut bočnog klizanja stražnjeg lijevog kotača

α_{r_R}	°	kut bo nog klizanja stražnjeg desnog kota a
δ_H	°	kut zakreta upravlja a
δ_f	°	kut zakretanja prednjih kota a
δ_r	°	kut zakretanja stražnjih kota a
$\dot{\psi}$	°/s	kutna brzina vozila oko vertikalne osi
$\ddot{\psi}$	°/s ²	kutno ubrzanje vozila oko vertikalne osi
$\Delta\alpha$	°	razlika kutova bo nog klizanja prednjih i stražnjih kota a
L	m	me uosovinski razmak vozila
T	m	širina traga kota a
U		preba aj
V		težište vozila
c	N/m	karakteristika (krutost) opruge
n	m	mehani ko predvo enje
x	m	skra enje/produljenje (progib) opruge
β	°	kut bo nog klizanja vozila
γ	°	bo ni nagib kota a
σ	°	bo ni nagib osi zakretanja kota a (dodatna oznaka prema [3] – δ)
τ	°	uzdužni nagib osi zakretanja kota a (dodatna oznaka prema [3] – ε)
φ	°	kut zakreta vozila oko uzdužne osi
ψ	°	kut zakreta vozila oko vertikalne osi
ϑ	°	kut zakreta vozila oko popre ne osi

SAŽETAK

Upravljanje vozila moguće je ispitati na mnoge načine, no Međunarodna organizacija za normizaciju (ISO – *International Organization for Standardization*) propisuje standardne ispitne procedure. U ovom se radu donosi pregled tih procedura i utjecajnih parametara vozila na upravljivost vozila prema dostupnoj literaturi. Provođenje tih procedura kako bi se ispitalo utjecaj pojedinih parametara je tehnološki i financijski zahtjevno. Stoga su danas računalne simulacije nezaobilazne kada se radi o razvoju vozila tj. o ispitivanju istih. U ovom su radu provedene simulacije standardnih ispitnih procedura te analiza rezultata koja uključuje njihovu usporedbu s proučavanom literaturom. Simulacije se provode u programskom paketu CarSim. Osim tog programskog paketa, za potrebe izrade ovog rada koristila se i aplikacija Excel iz programskog paketa Microsoft Office u kombinaciji s VBA (*Visual Basic for Applications*). Aplikacija je poslužila za lakšu manipulaciju i obradu rezultata simulacija.

Ključne riječi: upravljivost, parametri vozila, standardne ispitne procedure, računalne simulacije

SUMMARY

Vehicle handling can be tested in many ways, however standard test procedures have been provided by the International Organization for Standardization (ISO). This thesis presents an overview of these procedures and the influence of vehicle parameters on vehicle handling according to available literature. Performing these procedures to examine the impact of particular parameters is technologically and financially demanding. Therefore computer simulations are unavoidable when it comes to vehicle development, ie testing. In this paper, simulation of standard test procedures and analysis of results were performed, including their comparison with the data given in the studied literature. The simulations were carried out in the CarSim program package. In addition to this program package, the application Excel from the Microsoft Office program package was used in combination with VBA (Visual Basic for Applications). The application was used for easier manipulation and processing of simulation results.

Keywords: handling, vehicle parameters, standard test procedures, computer simulations

1. UVOD

Upravlјivost vozila jedan je od najvaţnijih aspekata svakog vozila, a ponajprije s gledišta aktivne sigurnosti samih vozila te zatim i s gledišta mogu nosti vozila da savladava zadatke na cesti koje mu zadaje voza . Upravlјivost se lai ki moţe opisati kao na in na koje vozilo odgovara odnosno reagira na pobude voza a, bilo preko upravlja a ili preko pedala, i druge pobude koje mogu djelovati na vozilo (okolina). Sli na definicija upravljanja navedena je i u [1], prema emu je bolja upravlјivost kada voza ima odli nu kontrolu nad vozilom i sposobno je slijediti pravac kretanja koji je voza zadao. Ako se ove dvije definicije objedine onda se moţe re i da je upravlјivost na in na koji se vozilo kre e cestom, tj. kako se ponaša kod skretanja, ubrzavanja i ko enja te kolika je vjerojatnost da pri tim radnjama izgubi kontrolu. Tada je bolja upravlјivost npr. kad vozilo pro e kroz zavoj što ve om brzinom, a vjerojatnost gubitka kontrole je što manja.

1.1. Steering feel

Uz pojam upravlјivosti (engl. *handling*) esto se spominje i pojam „*steering feel*“. U prijevodu na hrvatski najto nija definicija bi bila da je „*steering feel*“ povratna informacija kroz upravlja ki sustav automobila koju voza dobiva tijekom voţnje. Ta informacija moţe biti o gibanju vozila, i njegovom ponašanju prilikom nailaska na razli ite vanjske pobude (vrste ceste/podloga, zavoji i dr.), koli ini prijanjanja vozila na podlogu te o samom odzivu vozila na pobude voza a. „*Steering feel*“ omogu uje voza u procjenu kada e vozilo izgubiti prijanjanje i po eti klizati što mu daje ve u pouzdanost u vozilo, tj. ve u sigurnost u voţnji. Što je ta informacija opseţnija i jasnija to je „*steering feel*“ bolji. Ona nastaje u kontaktu kota a s podlogom te putuje od kota a kroz upravlja ki sustav vozila do voza a. Chevatco u svom radu [2] „*steering feel*“ definira kao vezu izme u upravlja a, momenta na upravlja u i odziva dinamike vozila poput bo nog ubrzanja ili kutne brzine oko vertikalne osi, a u što se mogu i uklju iti vibracije upravlja a. Tako er navodi se da je vaţno na i ravnoteţu izme u koli ine povratnih informacija i udobnosti, koju bi mogle narušiti nevaţne informacije, kroz vibracije i sl.

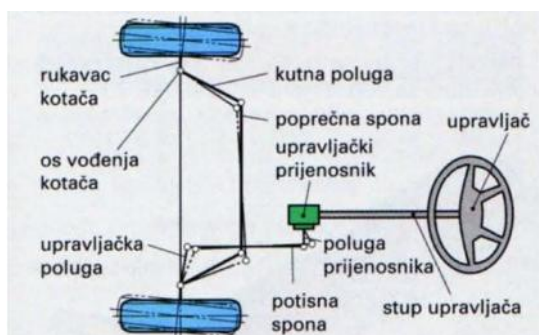
„*Steering feel*-om“ se bavi i Harnett u svom doktorskome radu pod nazivom *Objective Methods for the Assessment of Passenger Car Steering Quality* [3]. Ovaj rad razra uje hipotezu prema kojoj se kvaliteta upravlјivosti i „*steering feel*“ opisuju odnosima pobude i odziva sustava upravljanja i kako su ti odnosi percipirani od strane voza a. Odre ena su dobra svojstva upravlјivosti za takve odnose, te je proveden pokus u kojem su ta svojstva izmjenjena kako bi se utjecalo na kvalitetu upravlјivosti.

U daljnjem tekstu Harnett razra uje definiciju „*steering feel*“-a te navodi kako je ta veli ina samo po sebi subjektivna jer sadrţi rije *feel*, što zna i osje ati, a da bismo osjetili nešto trebamo subjekt. Stoga je teško znanstveno opisati takvu veli inu. Opisuje „*steering feel*“ kao spoj voza a i vozila, ovjeka i stroja, odnosno na in na koji voza komunicira s vozilom i obrnuto. Voza daje ulazne pobude sustavu i o ekuje odre ene odzive, te tu vezu izme u pobude i odziva interpretira kao osje aj upravljanja (engl. *steering feel*). Odre ene sile i signali, a pogotovo momenti se prenose preko upravlja a do voza a kroz njegove ruke.

1.2. Sustav upravljanja vozilom

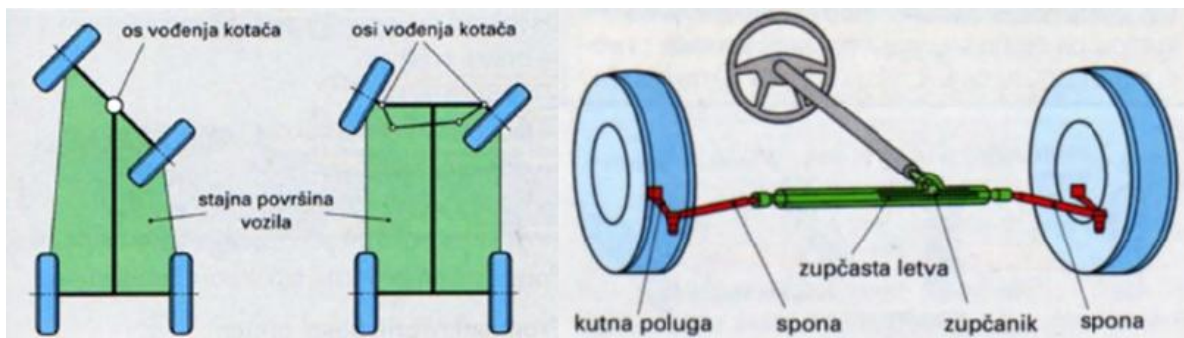
Osnovni upravljački sustav sastoji se od ovih dijelova (slika 1.) :

- upravljač,
- stup upravljača,
- upravljački prijenosnik,
- potisna spona,
- upravljačka poluga,
- poprečna spona,
- kutna poluga,
- rukavac kotača.



Slika 1. Shema osnovnog upravljačkog sustava [4]

Putnička i osobna vozila (kategorija M1¹) uglavnom koriste princip upravljanja zakretanjem rukavaca kotača (slika 2.)

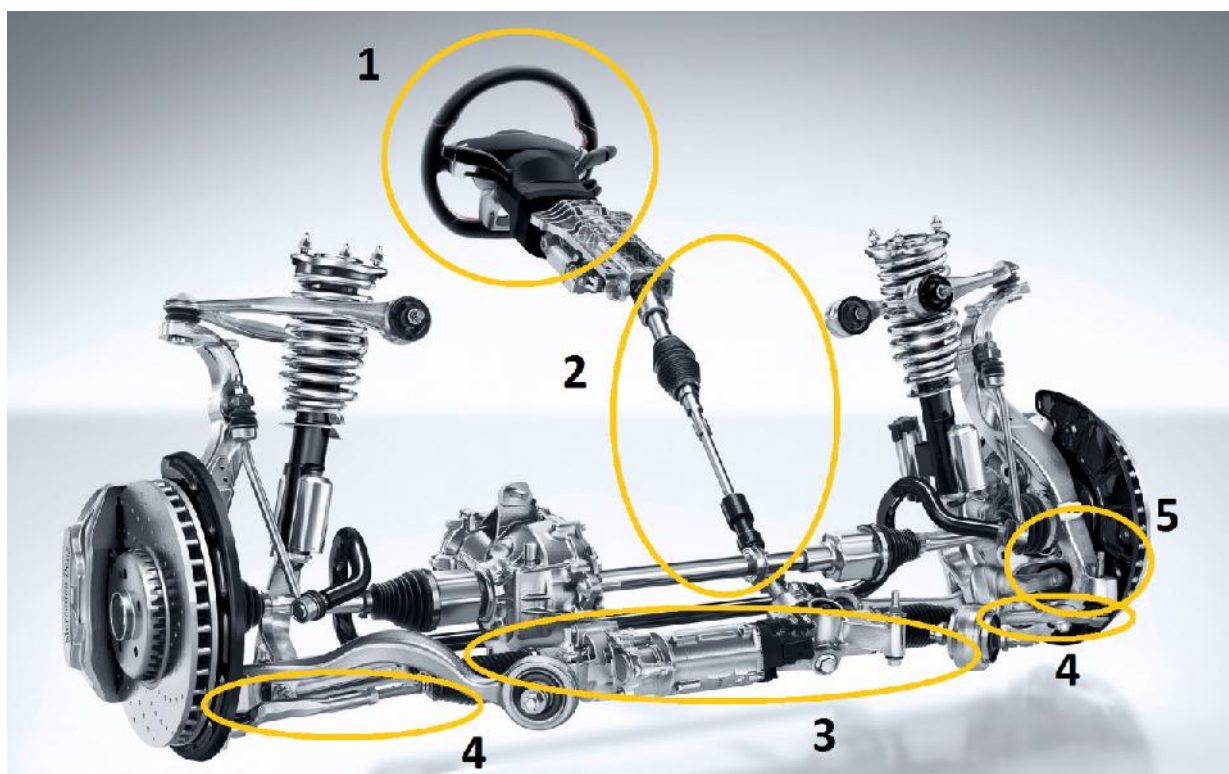


Slika 2. Shema upravljanja zakretnom osovinom (lijevo), zakretanjem rukavaca kotača (sredina) i upravljanje zakretanjem rukavaca - M1 kategorija (desno) [4]

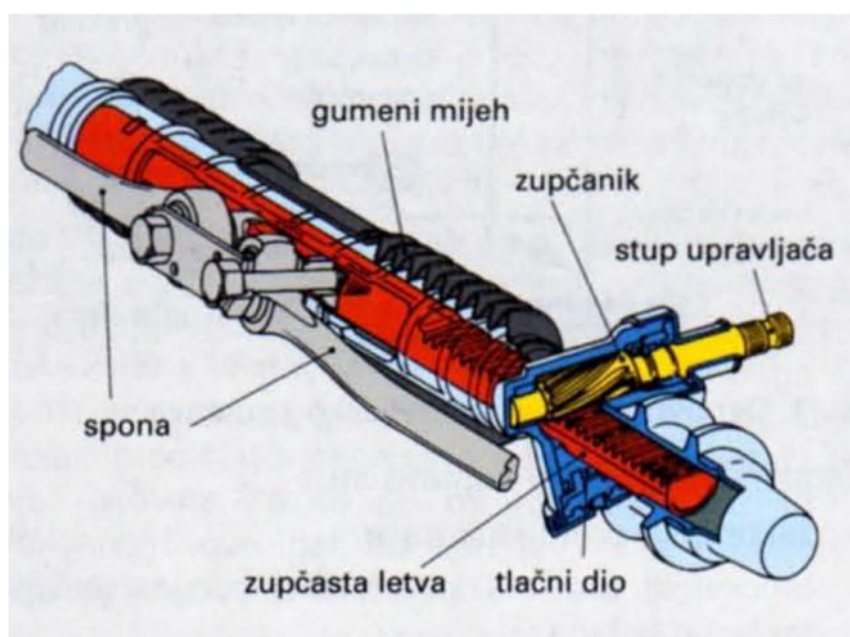
Neki od dijelova iz osnovnog upravljačkog sustava su u tom slučaju funkcionalno objedinjeni. Slika 3. pokazuje primjer takvog upravljačkog sustava sa brojano označenim dijelovima:

- 1 - upravljač,
- 2 - stup upravljača,
- 3 - upravljački prijenosnik (zupčanik i zupčasta letva),
- 4 - spona,
- 5 - kutna poluga (kao dio nosa kotača (rukavac)).

¹ kategorija M1 – (kategorija M - osobni automobili i autobusi) motorna vozila za prijevoz osoba koja osim sjedala za vozača imaju još najviše 8 sjedala



Slika 3. Primjer upravlja kog sustava vozila [5]

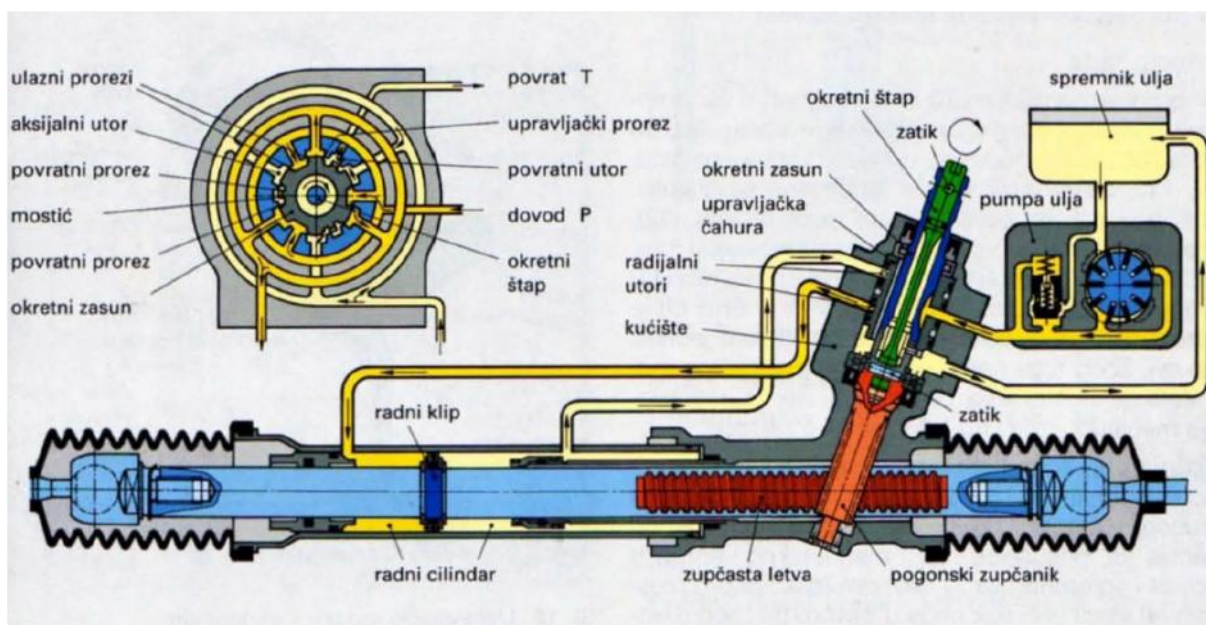


Slika 4. Upravlja ki prijenosnik [4]

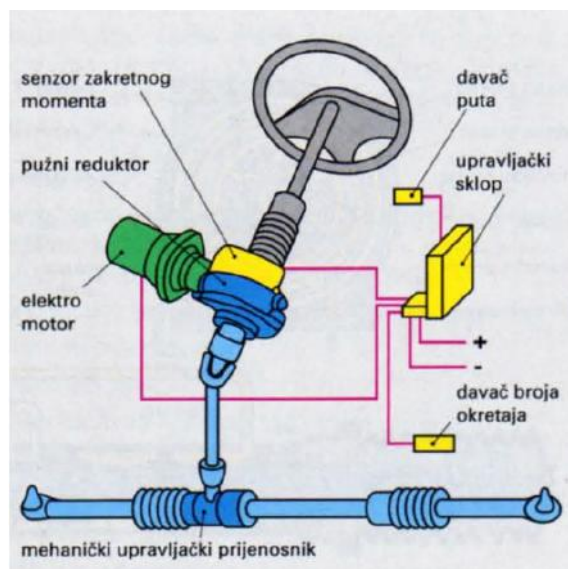
Upravlja ki prijenosnik (slika 4.) je reduktor koji pretvara kružno gibanje upravljača u translaciju zupčaste letve, tj. prenosi i pojačava okretni moment s upravljača na kotač. Prijenos mora biti takav da sila na upravljaču ne prijeđe zakonom propisanih 250 N. Dodatno pojačanje sile upravljanja u prijenosniku može se vršiti preko hidrauličkog servoupravljača (slika 5.) ili preko elektromotora (slika 6.). Spona je zglobna veza između upravljačkog prijenosnika i nosača

kota a. Stup upravlja a se uobi ajeno sastoji od kardanskog vratila koje spaja, a svrha mu je da prenese moment od upravlja a do prijenosnika. Kutna poluga je integrirana kao dio nosa a kota a. Primarna joj je svrha je lakše zakretanje kota a, a tako er ima i ulogu u ostvarivanju odre ene geometrije upravlja kog sustava. Za detaljnija pojašnjenja vidjeti u literaturi:

- Chassis Handbook – Fundamentals, Driving Dynamics, Components [1],
- Encyclopedia of automotive engineering [6],
- The Automotive Chassis: Engineering Principles [7].



Slika 5. Upravlja ki prijenosnik sa zup astom letvom i hidrauli kim servoure ajem [4]



Slika 6. Upravlja ki sustav s elektri kim servoupravljanjem [4]

1.3. Standardne ispitne procedure

Na upravljivost pa tako i na „*steering feel*“ utječe mnoštvo parametara vozila. Za ispitivanje utjecaja parametara na upravljanje koriste se ispitne procedure. Ispitne procedure koje su propisane normama, nazivamo standardnim ispitnim procedurama. Procedure su osmišljene tako da se promatra kretanje dinamičkih karakteristika vozila, te se pomoću njih pokušava dati mjerljiva veličina za ocjenjivanje upravljivosti. Ovo je važno iz razloga jer upravljivost spada u kategoriju subjektivnih veličina pa može varirati od vozača do vozača. Stoga su upravo simulacije ovakvih procedura na račun analu, i njihova stvarna provedba na ispitnom poligonu, a zatim i na cesti važne za usmjeravanje proizvođača vozila u kojem smjeru se treba ići i da bi se približilo dobrom upravljanju. Tek nakon toga može uslijediti subjektivno testiranje vozača na cesti ili trkačoj stazi. Na istu način je svoje istraživanje proveo i Harnett u gore spomenutom radu [3]. Nakon što je uspješno proveden pokus ispitivanja simulacijama, prešlo se na subjektivno ispitivanje kako bi se ispitala kvaliteta upravljivosti i informacije koje vozač dobiva. Usporedba rezultata ukazala je na dobro poklapanje rezultata objektivnog i subjektivnog ispitivanja.

Standardne ispitne procedure razrađene u ovom radu propisane su od strane Međunarodne organizacije za normizaciju (ISO – *International Organization for Standardization*), tj. to su takozvane ISO norme. Ove norme mogu se pronaći u katalogu normi vezanih uz cestovna vozila nazvanih ISO/TC 22 *Road vehicles*, tj. u katalogu normi Dinamika vozila i komponente podvozja: ISO/TC 22/SC 33 *Vehicle Dynamics and chassis components* [8].

Standardne ispitne procedure iz područja upravljivosti prema [8] su:

- 1) ISO 3888-1:1999 *Passenger cars – Test track for a severe lane-change manoeuvre – Part 1: Double Lane Change*; Osobni automobili – Ispitna staza za manevar nagle promjene pravca gibanja – 1. dio: Dvostruka promjena pravca gibanja
- 2) ISO 3888-2:2011 *Passenger cars – Test track for a severe lane-change manoeuvre – Part 2: Obstacle avoidance*; Osobni automobili – Ispitna staza za manevar nagle promjene prometnoga traka – 2. dio: Izbjegavanje zapreke
- 3) ISO 4138:2012 *Passenger cars – Steady state circular driving behaviour – Open-loop test methods*; Osobni automobili – Ponašanje pri ustaljenoj kružnoj vožnji – Metode ispitivanja otvorenim petljom
- 4) ISO 7401:2011 *Road Vehicles – Lateral transient response test methods – Open-loop test methods*; Cestovna vozila – Metode ispitivanja bočnog prijelaznog odziva – Metode ispitivanja otvorenim petljom
- 5) ISO 7975:2006 *Passenger cars – Braking in a turn – Open-loop test method*; Putnički automobili – Kočenje u zavoju – Metoda ispitivanja u otvorenom petljom
- 6) ISO 9816:2006 *Passenger cars – Power off reaction of a vehicle in a turn – Open loop test method*; Osobni automobili – Reakcija vozila u zaokretanja pri naglom otpuštanju papučice snage – Metoda ispitivanja otvorenim petljom

- 7) ISO 11026:2010 *Heavy commercial vehicles and buses – Open loop test methods for the quantification of on-centre handling – Weave test and transition test*; Teška komercijalna vozila i autobusi – Metode ispitivanja otvorenom petljom za kvantifikaciju upravljanja u središnjoj osi – Test krivudanjem i prijelazni test
- 8) ISO 13674-1:2010 *Road vehicles – Test method for the quantification of on-centre handling – Part 1: Weave test*; Cestovna vozila – Metoda ispitivanja otvorenom petljom za kvantifikaciju upravljanja u središnjoj osi – Test krivudanjem
- 9) ISO 13674-2:2016 *Road vehicles – Test method for the quantification of on-centre handling – Part 2: Transition test*; Cestovna vozila – Metode ispitivanja otvorenom petljom za kvantifikaciju upravljanja u središnjoj osi – Prijelazni test
- 10) ISO 14792:2011 *Road vehicles – Heavy commercial vehicles and buses – Steady-state circular tests*; Cestovna vozila – Teška komercijalna vozila i busevi – Kružni testovi ustaljenog stanja
- 11) ISO 14793:2011 *Heavy commercial vehicles and buses – Lateral transient response test methods*; Teška komercijalna vozila i autobusi – Metode ispitivanja bojnog prijelaznog odziva
- 12) ISO 14794:2011 *Heavy commercial vehicles and buses – Braking in a turn – Open-loop test methods*; Teška komercijalna vozila i autobusi – Kočenje u zavoju – Metode ispitivanja otvorenom petljom
- 13) ISO 17288-1:2011 *Passenger cars – Free-steer behaviour – Part 1: Steering-release open-loop test method*; Putnički automobili – Ponašanje kod slobodnog upravljanja – Dio 1: Metoda ispitivanja otvorenom petljom puštanjem upravljanja
- 14) ISO 17288-2:2011 *Passenger cars – Free-steer behaviour – Part 2: Steering-pulse open-loop test method*; Putnički automobili – Ponašanje kod slobodnog upravljanja – Dio 2: Metoda ispitivanja otvorenom petljom skokovitom pobudom upravljanja

Ostale norme vezane uz ovo područje su:

- 1) ISO 3833:1977 *Road vehicles – Types – Terms and definitions*; Cestovna vozila – Tipovi – Nazivi i definicije
- 2) ISO 8855:2011 *Road vehicles – Vehicle dynamics and road-holding ability – Vocabulary*; Cestovna vozila – Dinamika vozila i mogućnost odvijanja prijanjanja na podlogu – Rječnik
- 3) ISO 15037-1:2006 *Road vehicles – Vehicle dynamics test methods – Part 1: General conditions for passenger cars*; Cestovna vozila – Metode ispitivanja dinamike vozila – 1. dio: Opći uvjeti za osobne automobile

- 4) ISO 15037-2:2002 *Road vehicles – Vehicle dynamics test methods – Part 1: General conditions for heavy vehicles and buses*; Cestovna vozila – Metode dinami kih ispitivanja vozila – 2. dio: Op i uvjeti za teška vozila i autobuse
- 5) ISO 19364:2016 *Passenger cars – Vehicle dynamics simulation and validation – Steady state circular driving behaviour*; Putni ki automobili – Simulacija dinamike vozila i vrednovanje – Ponašanje tijekom ustaljene kružne vožnje

1.4. Ispitivanje u otvorenoj i zatvorenoj petlji

Dvije su osnovne vrste ispitivanja, ispitivanje u otvorenoj petlji i ispitivanje u zatvorenoj petlji. Kod ispitivanja u zatvorenoj petlji voza upravlja vozilom i odre uje smjer kretanja i ponašanja vozila u uzdužnom smjeru (ubrzavanje, ko enje), dok kod ispitivanja u otvorenoj petlji ulazne pobude su unaprijed odre ene i tako se lakše ponavljaju više puta bez odstupanja. Ispitivanje u otvorenoj petlji zna i da je utjecaj voza a sveden na minimum, tj. u takvim ispitivanjima vozilom se kontrolira robotiziranim upravljanjem. Za ispitivanja veze izme u sustava vozila i ovjeka kao kontrolora, se koriste ispitivanja u zatvorenoj petlji. Karakteristike obaju ispitivanja ukratko su prema [1]:

- a) za ispitivanje u zatvorenoj petlji:
 - vozilom upravlja testni voza do granica stabilnosti, upravljanje vozila se subjektivno vrednuje,
 - testni voza izvodi sa vozilom standardne voza ke manevre, kretanje parametara vozila se bilježi i analizira,
- b) za ispitivanje u otvorenoj petlji:
 - testovi se provode sa standardiziranim pobudama kontrola vozila (upravlja , pedala gasa, pedala ko nice), kretanje parametara vozila se bilježi i analizira,
 - dvije vrste ispitivanja:
 - zakret upravlja a zadan je kao funkcija,
 - upravlja se slobodno giba.



Slika 7. Ispitivanje u otvorenoj petlji [9]

Procedure koje se provode ispitivanjem u zatvorenoj petlji su:

- ISO 3888-1:1999 Osobni automobili – Ispitna staza za manevar nagle promjene pravca gibanja – 1. dio: Dvostruka promjena pravca gibanja,
- ISO 3888-2:2011 Osobni automobili – Ispitna staza za manevar nagle promjene prometnoga traka – 2. dio: Izbjegavanje zapreke ,
- ISO 14792:2011 Cestovna vozila – Teška komercijalna vozila i autobusi – Kružni testovi ustaljenog stanja,
- ISO 14793:2011 Teška komercijalna vozila i autobusi – Metode ispitivanja bo nog prijelaznog odziva.

Procedure koje se provode ispitivanjem u otvorenoj petlji su:

- ISO 4138:2012 Osobni automobili – Ponašanje pri ustaljenoj kružnoj vožnji – Metode ispitivanja otvorenom petljom,
- ISO 7401:2011 Cestovna vozila – Metode ispitivanja bo nog prijelaznog odziva – Metode ispitivanja otvorenom petljom,
- ISO 7975:2006 Putni ki automobili – Ko enje u zavoju – Metoda ispitivanja u otvorenom petljom,
- ISO 9816:2006 Osobni automobili – Reakcija vozila u zaokretanja pri naglom otpuštanju papu ice snage – Metoda ispitivanja otvorenom petljom,
- ISO 11026:2010 Teška komercijalna vozila i autobusi – Metode ispitivanja otvorenom petljom za kvantifikaciju upravljanja u središnjoj osi – Test krivudanjem i prijelazni test,
- ISO 13674-1:2010 Cestovna vozila – Metoda ispitivanja otvorenom petljom za kvantifikaciju upravljanja u središnjoj osi – Test krivudanjem,
- ISO 13674-2:2016 Cestovna vozila – Metode ispitivanja otvorenom petljom za kvantifikaciju upravljanja u središnjoj osi – Prijelazni test,
- ISO 14794:2011 Teška komercijalna vozila i autobusi – Ko enje u zavoju – Metode ispitivanja otvorenom petljom,
- ISO 17288-1:2011 Putni ki automobili – Ponašanje kod slobodnog upravljanja – Dio 1: Metoda ispitivanja otvorenom petljom puštanjem upravlja a,
- ISO 17288-2:2011 Putni ki automobili – Ponašanje kod slobodnog upravljanja – Dio 2: Metode ispitivanja otvorenom petljom skokovitim pobudom upravlja a.

2. STANDARDNE ISPITNE PROCEDURE

U uvodnom dijelu su nabrojane sve postojeće i trenutno važeće norme iz područja upravljanja, tj. koje propisuju standardne ispitne procedure. U ovom poglavlju će se detaljnije opisati kako se navedene procedure provode, te ukoliko je propisano koje se karakteristike trebaju promatrati i kako te rezultate interpretirati. Od svih standardnih ispitnih procedure navedenih u uvodnom dijelu obradit će se sljedeće norme, a za koje su kasnije i provedene simulacije:

- 1) ISO 3888-1:1999 Osobni automobili – Ispitna staza za manevar nagle promjene pravca gibanja – 1. dio: Dvostruka promjena pravca gibanja,
- 2) ISO 3888-2:2011 Osobni automobili – Ispitna staza za manevar nagle promjene prometnoga traka – 2. dio: Izbjegavanje zapreke,
- 3) ISO 4138:2012 Osobni automobili – Ponašanje pri ustaljenoj kružnoj vožnji – Metode ispitivanja otvorenom petljom,
- 4) ISO 7401:2011 Cestovna vozila – Metode ispitivanja božnog prijelaznog odziva – Metoda ispitivanja otvorenom petljom,
- 5) ISO 13674-1:2010 Cestovna vozila – Metoda ispitivanja otvorenom petljom za kvantifikaciju upravljanja u središnjoj osi – Test krivudanjem.



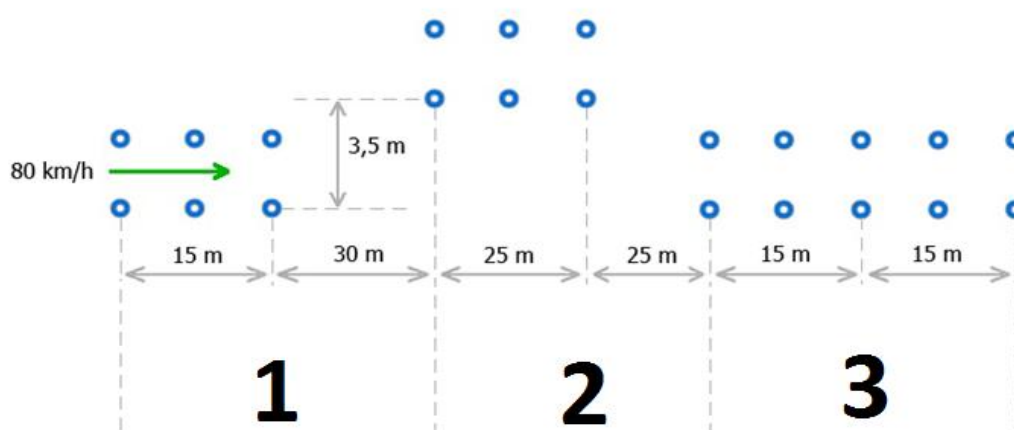
Slika 8. Izvođenje ispitne procedure ISO 3888-2 [10]

2.1. ISO 3888-1:1999 Dvostruka promjena pravca gibanja



Slika 9. Automobil na poligonu tijekom provedbe procedure dvostruke promjena pravca gibanja [11]

Dvostruka promjena pravca gibanja (engl. *Double Lane Change*) jedna je od najpoznatijih standardnih ispitnih procedura. Propisana je normom ISO 3888-1 1999 izvornog naziva engl. *Passenger cars – Test track for a severe lane-change manoeuvre – Part 1: Double Lane Change* [12]. Cilj ispitivanja je da se automobil stavi u svakodnevnu situaciju este izmjene pravca gibanja na više tra nom kolniku i izbjegavanja prepreka. Automobil mora pro i kroz ispitnu stazu definiranu unjevima bez da sruši ili pomakne bilo koji od njih, odnosno bez da izgubi kontrolu ili stabilnost. Normom je propisan izgled ispitne staze (slika 10.). Ispitna staza je ukupno duga ka 125 metara, a raspored unjeva vidljiv je na slici 10. U tablici 1. dane su dodatne dimenzije poligona, tj. širina izme u unjeva dijelova ispitne staze 1, 2 i 3 ozna enih na slici 10.



Slika 10. Ispitna staza za provedbu procedure dvostruke izmjene pravca [12]

Tablica 1. Dimenzije ispitne staze – dvostruka izmjena pravca [12]

Dio poligona	Širina ispitne staze između čunjeva
1	$1,1 \cdot \text{širina vozila} + 0,25 \text{ m}$
2	$1,2 \cdot \text{širina vozila} + 0,25 \text{ m}$
3	$1,3 \cdot \text{širina vozila} + 0,25 \text{ m}$

Norma [12] propisuje dva na ina ispitivanja. Kod prvog testa ispitno vozilo mora u ispitnu stazu u i ulaznom brzinom od 80 km/h s tolerancijom od ± 3 km/h, a dozvoljene su i druge brzine. Položaj pedale gasa tijekom prolaska kroz ispitnu stazu se ne smije mijenjati. Drugi test predvi a da se kroz ispitnu stazu pro e maksimalnom mogu om brzinom, a da vozilo uspješno završi test. Pri tome položaj pedale gasa može biti fiksiran, no dozvoljen je i bilo koji drugi položaj što je potrebno navesti u završnom izvješ u. Ostali uvjeti na ispitnoj stazi (uvjeti prijanjanja, vremenski uvjeti i dr.) propisani su normom ISO 15037-1:2006 naziva Cestovna vozila – Metode ispitivanja dinamike vozila – 1. dio: Op i uvjeti za osobne automobile (engl. *Road vehicles – Vehicle dynamics test methods – Part 1: General conditions for passenger cars*)[13]. Karakteristike koje bi se trebale promatrati tijekom ispitivanja nisu propisane ovom normom no prema [14] preporu a se promatranje ovih karakteristika:

- uzdužna i popre na brzina vozila, v_x i v_y ,
- ubrzanje vozila u uzdužnom i popre nom smjeru, a_x i a_y ,
- kut zakreta upravlja a i moment na upravlja u, δ_H i M_H ,
- sile kota e u smjeru svih triju osi, F_x , F_y , F_z ,
- bo ni kut klizanja kota a, α_f i α_r ,
- zakret vozila oko svih triju osi, φ , ϑ , ψ ,
- kutna brzina i ubrzanje vozila oko vertikalne osi, $\dot{\psi}$ i $\ddot{\psi}$.

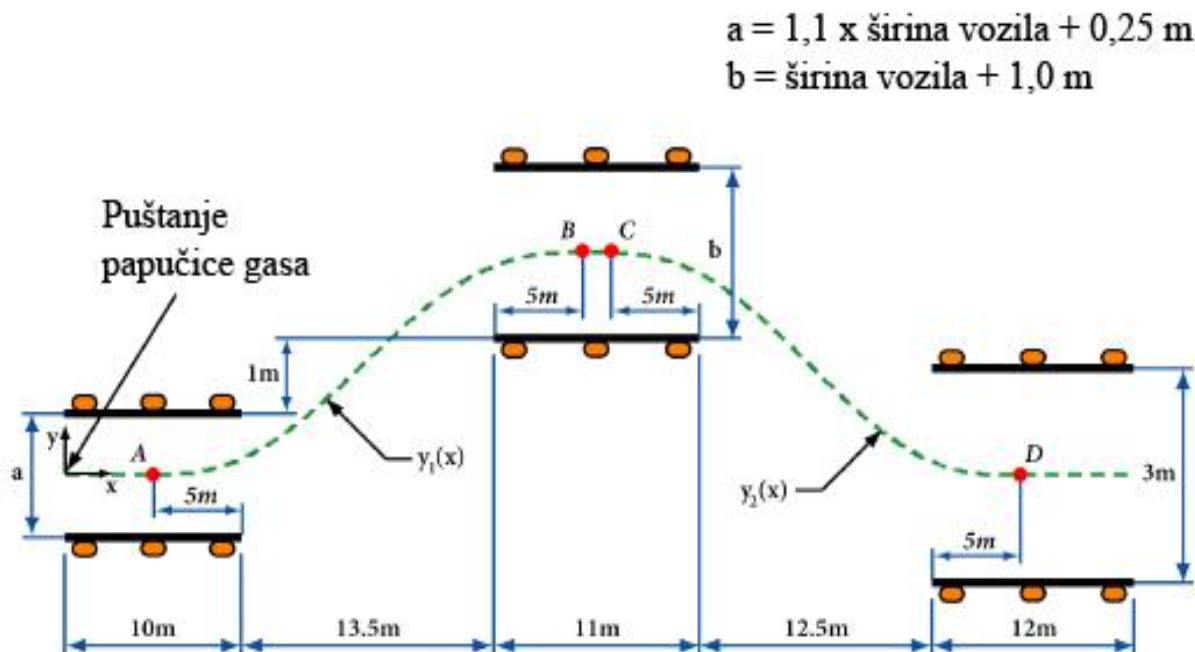
Sama norma [12] navodi da ova ispitna procedura bila je predvi ena za ispitivanje popre ne dinamike vozila, no utvrdilo se da uzdužna dinamika (iskoristivost snage motora) ima puno ve i utjecaj. Zbog toga i zbog mogu nosti druga ijih putanja kroz ispitni poligon dolazi do disipacije rezultata.

2.2. ISO 3888-2:2011 Izbjegavanje prepreke

Standardna ispitna procedura propisana normom ISO 3888-2:2011 [15], zapravo je funkcionalno identi na proceduri ISO 3888-1:1999. Puni naziv norme glasi ISO 3888-1:1999 Osobni automobili -- Ispitna staza za manevar nagle promjene prometnoga traka -- 2. dio: Izbjegavanje zapreke (engl. *Passenger cars – Test track for a severe lane-change manoeuvre – Part 2: Obstacle avoidance*). Ova procedura zapravo je važnije za ispitivanje stabilnosti vozila, no važno je napraviti razliku izme u ove dvije procedure zbog njihove sli nosti. Procedura je poznatija pod imenom „Moose test“. Slika 8. prikazuje provo enje takve procedure, gdje Jeep Grand Cheeroke (2014.) gubi stabilnost pri 71 km/h [10].

Zadatak ispitivanja je da vozilo tako er pro e kroz ispitnu stazu u dužini od 61 m definiranu unjevima bez da ih sruši ili pomakne bilo koji od njih, odnosno bez da izgubi kontrolu ili stabilnost. Na slici 11. prikazan je izgled ispitne staze propisan normom. Vozilo ulazi u ispitnu stazu brzinom od 50 km/h i to u najvišem stupnju prijenosa pri kojem brzina vrtnje motora nije manja od 2000 min⁻¹. Voza pušta pedalu gasa 2 metra nakon ulasku u ispitnu stazu te kroz nju prolazi bez pritiskanja pedala. Ispitivanje se ponavlja s pove anom brzinom ulaska sve dok vozilo ne izgubi stabilnost. Ostali uvjeti (uvjeti prijanjanja, vremenski uvjeti i dr.) na poligonu

su tako er propisani normom 15037-1:2006 [13]. Preporu a se samo subjektivno ocjenjivanje rezultata.



Slika 11. Ispitna staza za provedbu procedure izbjegavanja prepreke [15]

2.3. ISO 4138:2012 Ponašanje tijekom ustaljene kružne vožnje

Norma ISO 4138:2012 [17] propisuje standardnu ispitnu proceduru za ispitivanje ponašanja vozila tijekom ustaljenog gibanja po kružnoj putanji. Puni naziv norme glasi ISO 4138:2012 Osobni automobili -- Ponašanje pri ustaljenoj kružnoj vožnji -- Metode ispitivanja otvorenom petljom (engl. *Passanger cars – Steady state circular driving behaviour – Open-loop test methods*). Kako i sam naziv norme govori procedura se provodi kao ispitivanje u otvorenoj petlji. Tri testne metode propisane su normom:

1) Metoda 1 – metoda konstantnog radijusa:

- testiranje vozila pri nekoliko razli itih brzina po putanji poznatog radijusa,
- preporu ena veli ina radijusa putanje 100 m, minimalno preporu eno 40 m, minimalno 30 m,
- 1. na in provedbe ove metode testiranja: gibanje vozila po kružnoj putanji, nakon što se postigne ustaljeno gibanje trajanja barem 3 s mjere se dinami ke karakteristike,
- 2. na in provedbe ove metode testiranja: vozilo se giba po kružnoj putanji i polagano ubrzava, podaci se mjere kontinuirano.

2) Metoda 2 – metoda konstantnog kuta zakreta upravlja a:

- testiranje pri nekoliko brzina,
- 1. na in provedbe ove metode testiranja: gibanje vozila po pravcu, nakon ega se vozilu daje pobuda na upravlja u dok ne postigne ustaljeno gibanje po kružnoj putanji ,

- 2. na in provedbe ove metode testiranja: upravlja vozila je fiksiran, vozilo polagano ubrzava dok se ne izgubi stabilnost vozila, kut zakreta upravlja a takav da radijus putanje bude 30 m kod nižih brzina, min 20, a kod testiranja limita vozila 100 km/h.
- 3) Metoda 3 – metoda konstantne brzine kretanja vozila:
- brzina vozila u uzdužnom smjeru je konstantna na putanjama razli itih radijusa,
 - pri odabranoj brzini ubrzanje u popre nom smjeru treba biti $0,5 \text{ m/s}^2$ za radijus putanje,
 - preporu ena brzina kretanja vozila 100 km/h, dozvoljene i druge brzine u koracima od 20 km/h.

Tablica 2. Na ini provedbe ispitne procedure ISO 4138:2012 84[17]

Metoda	Konstanta	Varijabla	Izmjereno ili izračunato
Metoda 1	radijus	brzina	kut zakreta upravljača
Metoda 2	kut zakreta upravljača	brzina	radijus
Metoda 3	brzina	radijus	kut zakreta upravljača
Metoda 3	brzina	kut zakreta upravljača	radijus

U tablici 2. dane su konstante, odnosno varijable za svaku metodu. Dodatne varijable koje je potrebno izmjeriti su:

- brzina i ubrzanje vozila u uzdužnom smjeru, v_x i a_x ,
- brzina i ubrzanje vozila u popre nom smjeru, v_y i a_y ,
- kut zakreta upravlja a i moment na upravlja u, δ_H i M_H ,
- kutna brzina vozila oko vertikalne osi, ψ ,
- bo ni kut klizanja, β ,
- kut zakreta oko uzdužne osi, φ ,
- bo ni kut klizanja prednjih i stražnjih kota a, α_f i α_r .

Ispitivanje se provodi za desno i lijevo skretanje vozila, te se ponavlja nekoliko puta radi uprosje avanja rezultata. Ostali uvjeti na ispitnoj stazi (uvjeti optere enja vozila putnicima i teretom, uvjeti prijanjanja, vremenski uvjeti i dr.) propisani su normom 15037-1:2006 [13].

2.4. ISO 7401:2011 Ispitivanje bo nog prijelaznog odziva

Norma ISO 7401:2011 [18] propisuje standardnu ispitnu proceduru za ispitivanje bo nog prijelaznog odziva. Puni naziv norme glasi ISO 7401:2011 Cestovna vozila – Metode ispitivanja bo nog prijelaznog odziva – Metoda ispitivanja otvorenom petljom (engl. *Road Vehicles – Lateral transient response test methods – Open-loop test methods*). Ispitivanje se provodi u otvorenoj petlji, tj. normom je propisana brzina od 100 km/h pri kojoj se izvodi ispitna procedura te vrstu pobude na upravlja u. Norma dopušta i druge ispitne brzine u koracima od po 20 km/h. Nakon što zapo ne pobuda upravlja a, brzina vozila smije odstupati, no položaj pedale gasa se ne smije mijenjati. Ispitivanje se najprije provodi za standardno vozilo s dodanom masom voza a i opreme za ispitivanje (150 kg), raspore enom na mjesto voza a i suvoza a u vozilu (minimalna masa). Zatim se u sljede em ispitivanju dodaje po 68 kg za svakog putnika (ISO 15037-1:2006 [13] (maksimalna masa)). Ostali uvjeti na ispitnoj stazi (uvjeti prijanjanja, vremenski uvjeti i dr.) propisani su tako er normom 15037-1:2006 [13]. Norma [18] propisuje više vrsta pobuda na upravlja u:

a) Vremenska domena

1) Korak na pobuda (engl. *step input*):

- silovita trenuta na pobuda upravlja a, pri tom kutu zakreta treba ostati nekoliko sekundi, izme u 10 % i 90 % iznosa maksimalne pobude upravlja a ne smije pro i više od 0,15 s,
- pedala gasa ostaje u konstantnom položaju, tolerancija brzine ± 2 km/h,
- kut zakreta upravlja a odre uje se ustaljenom kružnom vožnjom pri kojoj se postiže ubrzanje vozila u popre nom smjeru od 4 m/s^2 (2 m/s^2 , 6 m/s^2)
- provesti za skretanje udesno i ulijevo,
- odrediti: vrijeme odziva, vršno vrijeme odziva i preba aj ubrzanja u popre nom smjeru i kutne brzine oko vertikalne osi.

2) Sinusoidna pobuda (engl. *continuous sinusoidal input*):

- trajanje jedan period, frekvencija 0,5 (1) Hz,
- pedala gasa ostaje u konstantnom položaju,
- postupno pove ati kut zakreta upravlja a dok se ne postigne ubrzanje vozila u popre nom smjeru od 4 m/s^2 (2 m/s^2 , 6 m/s^2),
- provesti 3 testa za kombinaciju odabrane brzine i kuta zakreta upravlja a,
- odrediti: ubrzanje vozila u popre nom smjeru, kutnu brzinu vozila oko popre ne osi, te kašnjenje kuta zakreta volana u odnosu na te dvije karakteristike, porast ubrzanja vozila u popre nom smjeru i kutne brzine vozila oko popre ne osi.

b) Frekvencijska domena

1) Nasumi na pobuda (engl. *random input*):

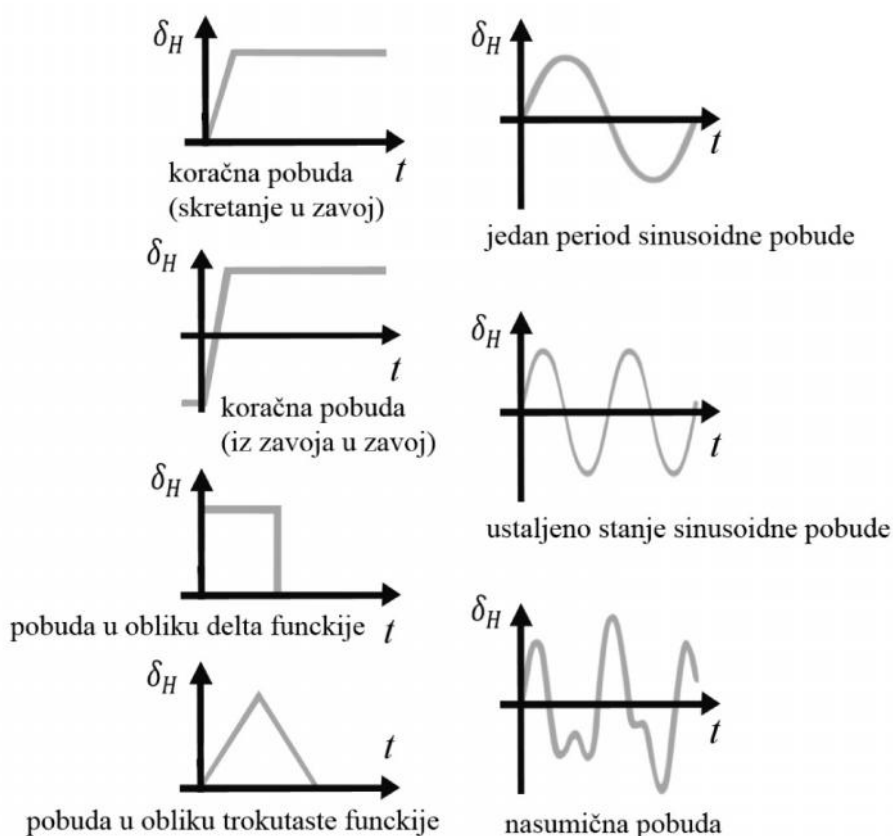
- kut zakreta upravlja a odre uje se ustaljenom kružnom vožnjom pri kojoj se postiže ubrzanje vozila u popre nom smjeru od 3 m/s^2 ,
- tolerancija brzine ± 3 km/h,
- kontinuirana pobuda volana frekvencije od 0,2 do 2 Hz,
- odrediti: ubrzanje vozia
- a u popre nom smjeru u odnosu na kut zakreta upravlja a, kutnu brzinu vozila oko vertikalne osi u odnosu na kut zakreta upravlja a.

2) Impulsna pobuda (engl. *pulse input*):

- tolerancija brzine ± 2 km/h,
- trokutasti oblik funkcije pobude upravlja a, širina impulsa 0,3 do 0,5 s, 3 do 5 s održavati neutralni položaj upravlja a,
- kut zakreta upravlja a odre uje se ustaljenom kružnom vožnjom pri kojoj se postiže ubrzanje vozila u popre nom smjeru od 4 m/s^2 .

3) Kontinuirana sinusoidna pobuda (engl. *continuous sinusoidal input*):

- kontinuirano pove anje frekvencije pobude od 0,2 do 2 Hz,
- kut zakreta upravlja a odre uje se ustaljenom kružnom vožnjom pri kojoj se postiže ubrzanje vozila u popre nom smjeru od 4 m/s^2 (2 m/s^2 , 6 m/s^2),
- odrediti: porast ubrzanja vozila u popre nom smjeru i kutne brzine vozila oko popre ne osi, fazne kutove.



Slika 12. Primjeri pobuda upravlja a prema [1]

Od svake domene potrebno je izabrati barem jednu vrstu pobude za provo enje ispitne procedure. Važne karakteristike u vremenskoj domeni su:

- kašnjenje izme u kuta zakreta upravlja a, bo nog ubrzanja i kutne brzine oko vertikalne osi,
- vrijeme odziva bo nog ubrzanja i kutne brzine oko vertikalne osi,
- porast bo nog ubrzanja (bo no ubrzanje podijeljeno s kutom zakreta upravlja a),

- porast kutne brzine oko vertikalne osi (kutna brzina oko vertikalne osi podijeljena s kutom zakreta upravlja α),
- vrijednosti preba α ja.

Važne karakteristike u frekvencijskoj domeni su amplituda i faza:

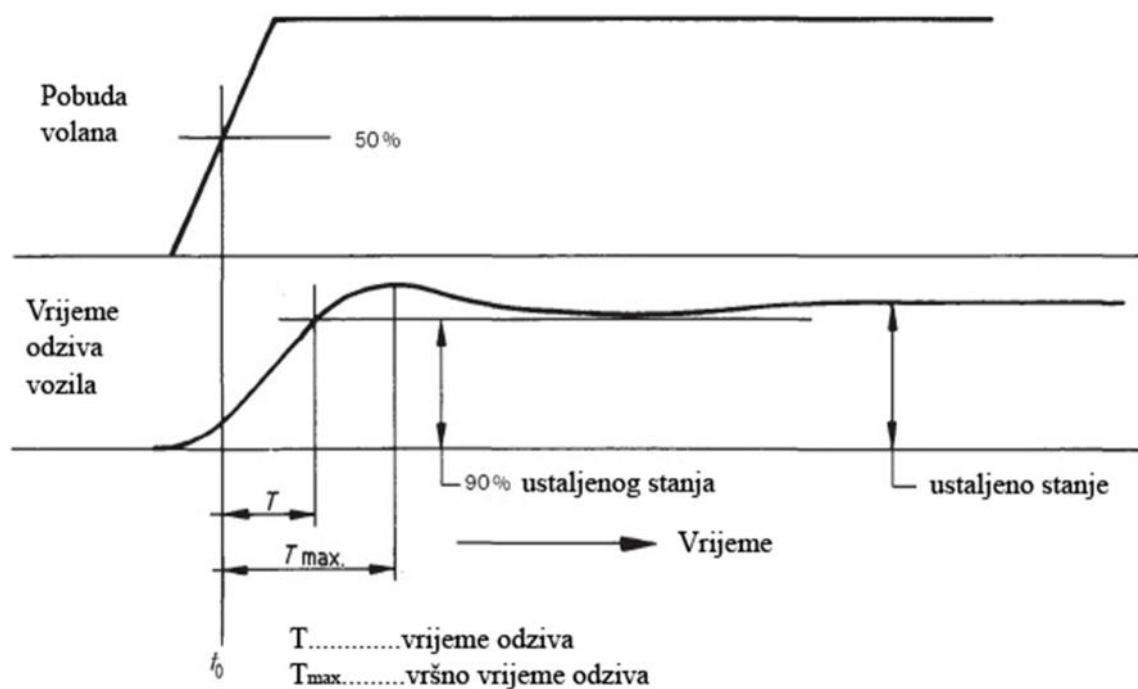
- bo nog ubrzanja u odnosu na kut zakreta upravlja α ,
- kutne brzine oko vertikalne osi u odnosu na kut zakreta upravlja α .

Varijable koje je potrebno odrediti su:

- kut zakreta upravlja α , δ_H ,
- ubrzanje vozila u popre nom smjeru, a_y ,
- kutna brzina oko vertikalne osi, ψ ,
- brzina vozila u uzdužnom smjeru, v_x .

a mogu se odrediti i ove varijable:

- a) kut zakreta vozila oko uzdužne osi, φ ,
- b) kut bo nog klizanja, α_f i α_r ,
- c) brzina vozila u popre nom smjeru, v_y ,
- d) moment na upravlja u, M_H .



Slika 13. O itavanje rezultata ISO 7401:2011 [18]

Na slici 13. prikazano je na in o itavanja karakteristika. Za po etno vrijednost t_0 uzima se trenutak kada pobuda volana dostigne 50 % amplitude. Vrijeme odziva je vrijeme od trenutka

t_0 do 90 % ustaljenog stanja gibanja vozila, dok se vršno vrijeme odziva mjeri do maksimalne vrijednosti karakteristike na koju se krivulja odnosi. Preba aj se ra una kao omjer; razlika maksimalne vrijednosti i ustaljenog stanja podijeljena s vrijednosti ustaljenog stanja.

2.5. ISO 13674-1:2010 Test krivudanjem

ISO 13674-1:2010 [19] propisuje standardnu ispitnu proceduru za vrednovanje upravljanja vozila u središnjoj osi. Upravljanje u središnjoj osi (engl. *on centre handling*) norma definira kao opis osje aja upravljanja (engl. *steering feel*) i preciznosti kod vožnje po pravcu i u svladavanju zavoja velikih radijusa pri velikim brzinama, a kada je ubrzanje u popre nom smjeru malo. Puni naziv norme glasi ISO 13674-2:2010 Cestovna vozila – Metoda ispitivanja otvorenom petljom za kvantifikaciju upravljanja u središnjoj osi – Test krivudanjem (engl. *Road vehicles – Test method for the quantification of on-centre handling – Part 1: Weave test*). Ispitivanje se provodi u otvorenoj petlji, tj. normom je propisana brzina od 100 km/h (dozvoljene i druge brzine u koracima od 20 km/h) pri kojoj se izvodi ispitna procedura te vrsta pobude na upravlja u. Ostali uvjeti na ispitnoj stazi (uvjeti optere enja vozila putnicima i teretom, uvjeti prijanjanja, vremenski uvjeti i dr.) propisani su normom 15037-1:2006 [13]. Norma preferira oscilatorne pobude volana u obliku sinusoide frekvencije 0,2 Hz tolerancije $\pm 10\%$. Druge vrste pobude su dopuštene poput trokutastog oblika funkcije pobude (slika 12.). Amplituda sinusoide, tj. kut zakreta upravlja a nije direktno zadan ve ga je potrebno odrediti ustaljenom kružnom vožnjom (ISO 4138:2011 [17]), tako da se kod odabranog zakreta upravlja a postiže ubrzanje vozila u popre nom smjeru od 2 m/s^2 (1 m/s^2 , 4 m/s^2). Trajanje ispitne procedure norma propisuje na 40 sekundi odnosno barem 8 ciklusa sinusoide. Rezultati ispitivanja prikazuju se u obliku histerezi kao što je prikazano na slici 14. Karakteristike koje se trebaju dobiti ispitivanjem su :

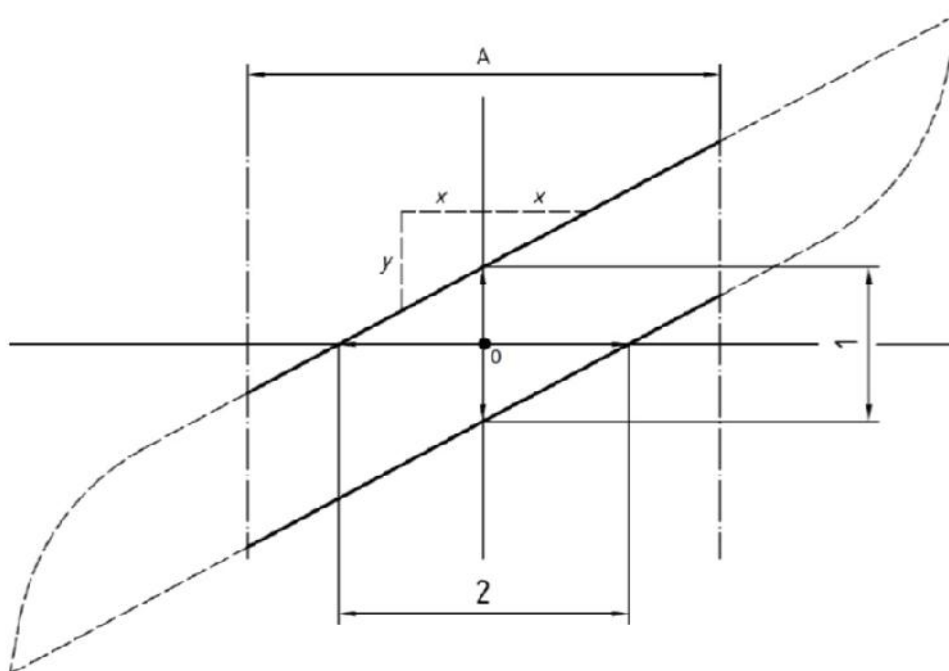
- moment na upravlja u, M_H ,
- kut zakreta upravlja a, δ_H ,
- kutna brzina vozila oko vertikalne osi, $\dot{\psi}$,
- ubrzanje vozila u popre nom smjeru (bo no ubrzanje), a_y .

Tablica 3. Prikaz rezultata ispitne procedure ISO 13674-1:2010 [19]

X - OS		Y- OS	
Karakteristika	Oznaka	Karakteristika	Oznaka
moment na upravljaču	M_H	kut zakreta upravljača	δ_H
kutna brzina oko vertikalne osi	$\dot{\psi}$	kut zakreta upravljača	δ_H
kutna brzina oko vertikalne osi	$\dot{\psi}$	moment na upravljaču	M_H
bočno ubrzanje vozila	a_y	kut zakreta upravljača	δ_H
moment na upravljaču	M_H	bočno ubrzanje vozila	a_y

Preklapanjem ovih etiriju karakteristika na na in kako je prikazano u tablici 3. se dobivaju histereze iz kojih se o itavaju kona ni rezultati. Za svaku pojedinu histerezu propisane su karakteristike koje je potrebno o itati iz takvog dijagrama. Karakteristike se o itavaju na

nekoliko na ina. Mogu se o itavati kao mrtva podru ja (engl. *deadband*) na ordinati ili apscisi, što su zapravo rasponi krivulja histereze u podru ju ordinate i apscise. Druge karakteristike se o itavaju kao gradijenti krivulja histereze na nekom rasponu A (slika 14), a koji je propisan normom. Uobi ajeno se taj raspon kre e od 10 % do 20 % vršne vrijednosti karakteristike koja je smještena na apscisi. Tako er se direktno o itavaju karakteristike za propisane dinami ke karakteristike (npr. moment na upravlja u pri 0 m/s² bo nog ubrzanja vozila).



Legenda

- 1 Mrtvo područje na ordinati (ordinate deadband)
- 2 Mrtvo područje na apscisi (abscissa deadband)
- A Raspon područja krivulje polinoma

$$\text{Gradijent} = \frac{y}{2x}$$

Slika 14. Prikaz rezultata ispitne procedure ISO 13674-1:2010 [19]

2.6. Kratak pregled ostalih standardnih ispitnih procedura

U ovom radu se ne e razmatrati standardne ispitne procedure vezane uz teška komercijalna vozila (N2² i N3³) i autobuse (M2⁴ i M3⁵).

² kategorija N2 – (kategorija N – teretni automobili) motorna vozila za prijevoz tereta najve e dopuštene mase izme u 3500 kg i 12000 kg

³ kategorija N3 – (kategorija N – teretni automobili) motorna vozila za prijevoz tereta najve e dopuštene mase ve e od 12000 kg

⁴ kategorija M2 – (kategorija M – osobni automobili i autobusi) motorna vozila za prijevoz osoba koja osim sjedala za voza a imaju više od 8 sjedala i najve e dopuštene mase manje od 5000 kg

⁵ kategorija M3 – (kategorija M – osobni automobili i autobusi) motorna vozila za prijevoz osoba koja osim sjedala za voza a imaju više od 8 sjedala i najve e dopuštene mase ve e od 5000 kg

2.6.1. ISO 7975:2006 Ko enje u zavoju

Ispitna procedura [20] provodi se kao ispitivanje u otvorenoj petlji. Ovom se procedurom ispituje utjecaj ko enja na održanje smjera kretanja vozila i ponašanje vozila, tj. kako ko enje utje e na ustaljeno gibanje vozila kružnom putanjom. Rezultatima ispitivanja važno je prikazati odstupanje od zadane putanje, promjenu u popre noj stabilnosti i promjenu ubrzanja u popre nom smjeru u odnosu na ustaljeno stanje.

2.6.2. ISO 9816:2006 Reakcija na prekid dotoka snage u zavoju

Ispitna procedura [21] provodi se kao ispitivanje u otvorenoj petlji. Cilj ove ispitne procedure je da se utvrdi efekt iznenadnog potpunog puštanja pedale gasa na održanje pravca kretanja. Vozilo kre e iz ustaljenog stanja kružne vožnje. Postoji nekoliko na ina provedbe ispitne procedure: s konstantnom brzinom, s konstantnim radijusom vožnje i konstantnim zakretom upravlja a. Karakteristike koje je potrebno pratiti tijekom ispitivanja su:

- kut zakreta upravlja a, δ_H ,
- trenutak puštanja pedale gasa, t_0 ,
- zakret i kutnu brzinu oko vertikalne osi, ψ i $\dot{\psi}$,
- brzinu i ubrzanje vozila u uzdužnom smjeru, v_x i a_x ,
- brzinu i ubrzanje vozila u popre nom smjeru, v_y i a_y ,
- bo ni kut klizanja, β .

2.6.3. ISO 13674-2:2016 Metoda ispitivanja u otvorenoj petlji za kvantifikaciju upravljanja u središnjoj osi – Prijelazni test

Ispitna procedura [22] provodi se kao ispitivanje u otvorenoj petlji. Preporu ena brzina vozila pri kojoj se izvodi ispitivanje je 100 km/h, a mogu e su i druge brzine u koracima od po 20 km/h. Po etno kretanje vozila je ustaljeno po pravcu nakon ega voza daje pobudu na upravlja u, takvu da se pove ava amplituda pobude, a brzina promjene kuta zakreta upravlja a $\left(\frac{a\delta_H}{a}\right)$ ostaje konstantna (engl. *ramp input*). Na temelju rezultata ispitivanja sastavljaju se dijagrami krivulja kako je prikazano u tablici 4. Tada se iz njih o itavaju karakteristi ne veli ine propisane normom.

Tablica 4. Prikaz rezultata ispitne procedure ISO 13674-2:2016 [22]

X - OS		Y- OS	
Karakteristika	Oznaka	Karakteristika	Oznaka
moment na upravljaču	M_H	kut zakreta upravljača	δ_H
kutna brzina oko vertikalne osi	$\dot{\psi}$	kut zakreta upravljača	δ_H
kutna brzina oko vertikalne osi	$\dot{\psi}$	moment na upravljaču	M_H
bočno ubrzanje vozila	a_y	kut zakreta upravljača	δ_H
bočno ubrzanje vozila	a_y	moment na upravljaču	M_H

2.6.4. 17288-1:2011 Ponašanje kod slobodnog upravljanja – Dio 1: Metoda ispitivanja u otvorenoj petlji puštanjem upravljača

Ispitna procedura [23] provodi se kao ispitivanje u otvorenoj petlji. Ovaj test je namijenjen za vrednovanje sposobnosti vozila da se vrati u gibanje po pravcu nakon otpuštanja upravljača vozila koje se giba u ustaljenoj kružnoj putanji. Preporučena brzina kretanja vozila je 100 km/h. Božićno ubrzanje vozila treba iznositi 1 m/s^2 te se povećavati do postizanja limita vozila. Ispitivanje se provodi za skretanje vozila u desno, a zatim i za skretanje ulijevo. Dinamičke karakteristike koje je potrebno izmjeriti su:

- brzina vozila u uzdužnom smjeru, v_x ,
- ubrzanje vozila u poprečnom smjeru, a_y ,
- kutna brzina oko vertikalne osi, $\dot{\psi}$,
- kut zakreta upravljača, δ_H .

2.6.5. ISO 17288-2:2011 Ponašanje kod slobodnog upravljanja – Dio 2: Metoda ispitivanja u otvorenoj petlji skokovitim pobudom upravljača

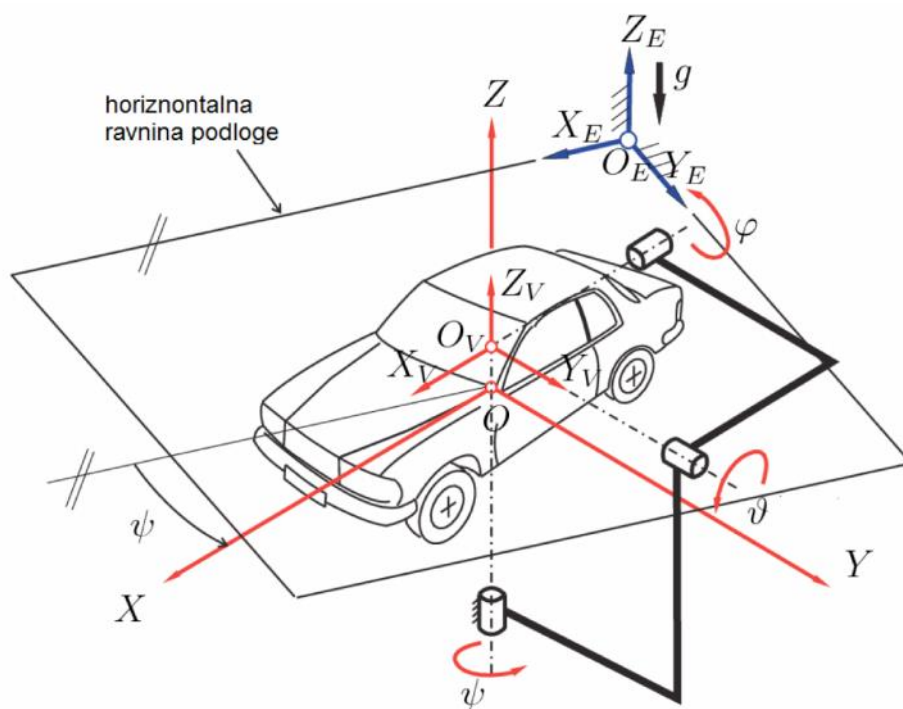
Ispitna procedura [24] provodi se kao ispitivanje u otvorenoj petlji. Ova procedura ima istu namjenu kao i ISO 17288-1, no drugačiji na primjenu. Vozilo kreće iz ustaljenog stanja gibanja po pravcu, nakon čega se vozilu pobuđuje upravljač impulsnom pobudom. Vozač nakon davanja pobude upravljača trenutno pušta volan, a pedala gasa ostaje u konstantnom položaju. Dinamičke karakteristike koje je potrebno izmjeriti su:

- brzina vozila u uzdužnom smjeru, v_x ,
- ubrzanje vozila u poprečnom smjeru, a_y ,
- kutna brzina oko vertikalne osi, $\dot{\psi}$,
- kut zakreta upravljača, δ_H .

3. MODELI ZA ANALIZU DINAMIKE I PROGRAMSKI PAKETI

3.1. Dinamika vozila

Dinamika vozila je dio mehanike koji se bavi proučavanjem pojava vezanih za gibanje vozila i rezultiraju ih sila i momenta, a utemeljena je na Newtonovim zakonima. Obuhvaća interakciju vozila, vozača, opterećenja i okoliša, a služi poboljšanju upravljivosti, stabilnosti, aktivne sigurnosti i komfora vožnje. Dinamika vozila razvila se na temelju klasične mehanike (statike, kinematike, dinamike) te istraživanja inženjera u razvoju vozila od početaka cestovnih vozila. Prema [25] dinamiku vozila možemo podijeliti prema koordinatnim osima vozila. Koordinatni sustav vozila definiran je ISO normom 8855:2011 [26] (slika 15.).



Slika 15. Koordinatni sustav vozila prema ISO 8855:2011 [25]

Na temelju tako postavljenog koordinatnog sustava, dinamika vozila se dijeli na [25]:

- uzdužnu dinamiku vozila (engl. *Longitudinal Dynamics*),
- poprečnu dinamiku vozila (engl. *Lateral Dynamics*),
- vertikalnu dinamiku vozila (engl. *Vertical Dynamics*),

a može se još izdvojiti i:

- dinamika gume (engl. *Tire Dynamics*),
- dinamika cijelog vozila (engl. *Full-vehicle Dynamics*).

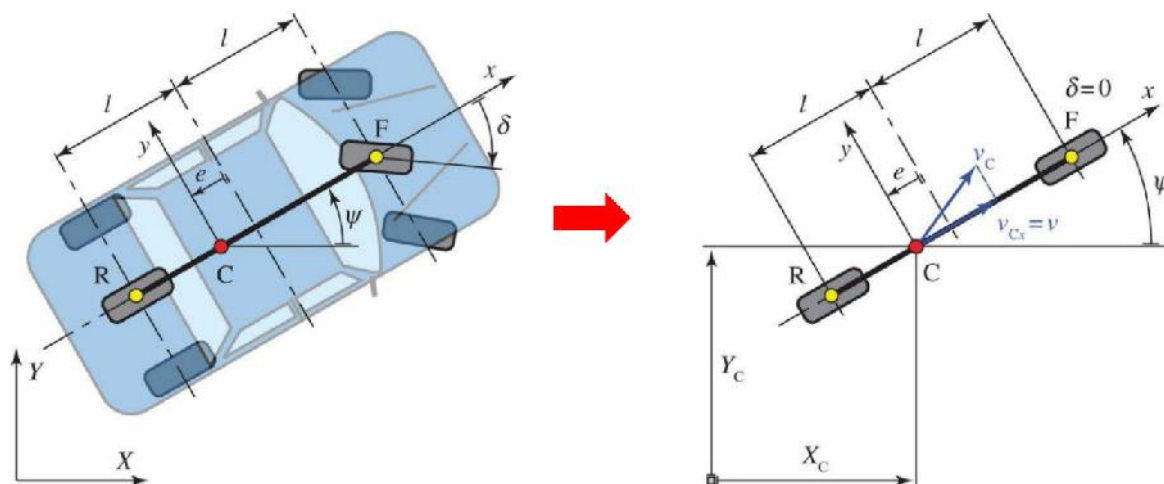
Ovakva podjela dinamike omogućuje i promatranje pojedinih sustava vozila zasebno i uvođenje pojednostavljenja te uporabu jednostavnih ravninskih modela za temeljno razumijevanje dinamike vozila.

3.2. Simulacijski modeli

Kako bi se opisala dinamika vozila koriste se dva osnovna pristupa. Prvi pristup je teoretski zasnovan na matematičkim modelima izvedenim iz fizike. Drugi pristup je eksperimentalno modeliranje struktura ija je osnova također matematički formulirana, ali su parametri sustava kontrolirani kroz ulazna i izlazna mjerenja. Takav pristup još se naziva identifikacija modela (engl. *model identification*). Uobičajeno se koristi za određivanje parametara teoretskih modela koji su nepoznati ili ih je nemoguće izmjeriti (npr. modeli gume, prigušiva i od gume i sl.). U tablici 5. dan je pregled modela, s njihovim osnovnim karakteristikama.

Tablica 5. Pregled mogućnosti modela vozila: vrste gibanja, stupnjevi slobode, frekvencijsko područje [27]

	Model s jednim tragom kotača		Model s dva traga kotača		MBS modeli		
	linearni	nelinearni	bez kinematike	s kinematikom	reducirani	kompleksni	kombinirani s MKE ⁶
Vrsta gibanja	pravocrtno gibanje, zakret oko vertikalne osi						
	zakret oko uzdužne osi, zakret oko poprečne osi, vertikalna dinamika						
					gibanje komponenti		
					specijalne namjene, prevrtanja, nesreća, sudar		
Broj SSG ⁷	2	3 - 7	14 - 25		>20		>20
Frekvencijsko područje	0 - 2 Hz		0 - 5 Hz		0 - 30 Hz		0 - 200 Hz



Slika 16. Model s jednim tragom kotača [25]

Model s jednim tragom kotača omogućuje temeljnu analizu upravljivosti i stabilnosti. Dvije su osnovne vrste modela s jednim tragom kotača, linearni i nelinearni, a u literaturi [27] se još spominje i linearni model s kutom zakreta oko uzdužne osi (engl. *linear roll model*). Linearni

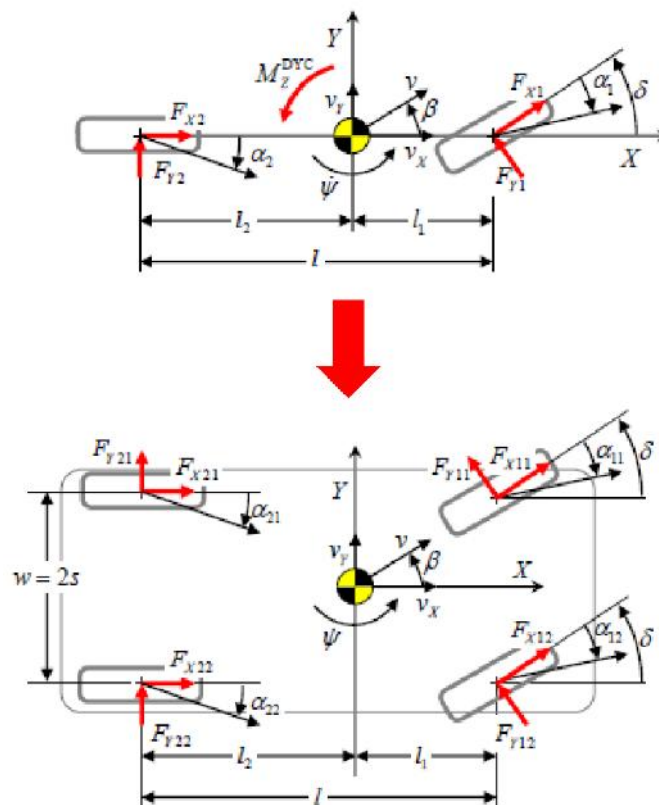
⁶ MKE – metoda konačnih elemenata

⁷ SSG – stupnjevi slobode gibanja

model omoguće pojednostavljeni opis poprečne dinamike vozila, ali koji je još uvijek fizikalno ispravan. Pojednostavljenja prema [27] su:

- uzdužne sile se zanemaruju ($v_x = \text{konst.}$),
- vertikalni pomak, rotacija oko uzdužne i poprečne osi se zanemaruju,
- masa vozila koncentrirana u težištu vozila,
- prednji i stražnji kotač i e biti zamijenjeni s jednim kotačem na svakoj osovini, sile na kotač u središtu osovine, raspodjela opterećenja između prednje i stražnje osovine je konstantna
- moguće odrediti: kut zakreta oko vertikalne osi ψ , kutna brzina oko vertikalne osi $\dot{\psi}$, bojni kut klizanja β .

Nelinearni model iako i dalje vrlo pojednostavljen, za razliku od linearnog omogućuje opis dinamike vozila kod većih kutova zakreta upravljača, većeg ubrzanja u poprečnom smjeru i opis pogonskog sklopa. Stupnjevi slobode uključuju pomake u uzdužnoj i poprečnoj osi te rotaciju oko vertikalne osi. Za više detalja vidjeti literaturu [27].



Slika 17. Model s dva traga kotača [25]

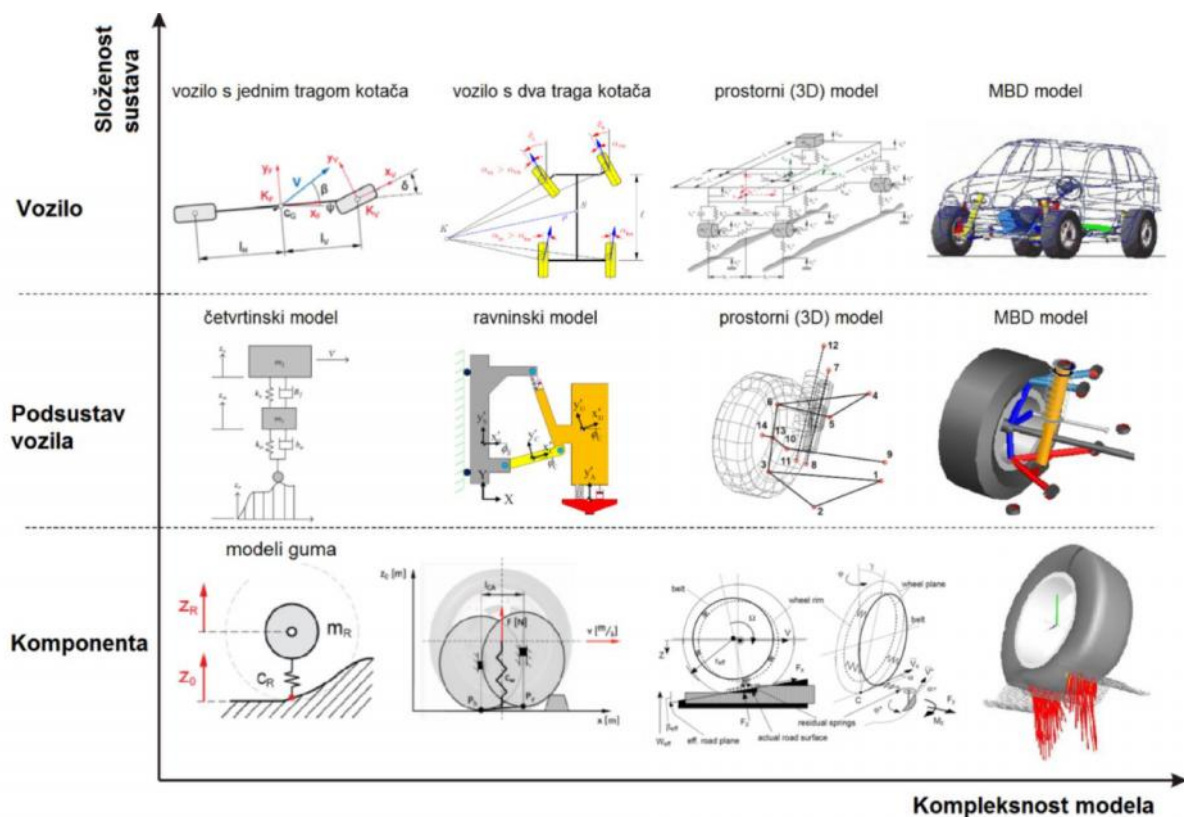
Model s dva traga kotača može se modelirati kao model bez kinematike ovjesa ili sa kinematikom ovjesa. Kod prvih se kinematika ovjesa uopće ne modelira, a kotači su sa šasijom povezani samo preko sila opruge i prigušenja. Kotač se giba relativno u odnosu na šasiju te okomito na podlogu. Stupnjevi slobode uključuju pomake i zakrete oko svih koordinatnih osi, kut zakreta kotača oko osi samog kotača te vertikalni pomak kotača. Model sa kinematikom ovjesa kotača ima 14 stupnjeva slobode gibanja. Kinematika se opisuje funkcijama koordinate

$\varphi_i, i = 1, \dots, 4$ koja predstavlja kretanje kota a. Konstrukcijsko rješenje samog ovjesa se u ovom modelu ne uzima u obzir. Za više detalja vidjeti literaturu [27].



Slika 18. MBS model vozila iz programskog paketa CarSim

MBS⁸ sustavi su prikladni za opisivanje mehaničkih sustava sastavljenih od tijela i povezanih preko ležajeva ili zglobova. Kruta tijela karakteriziraju njihova masa i moment inercije, a karakteristične su točke su težište i vorovi u kojima djeluju koncentrirane sile i momenti ili su preko njih povezani s drugim tijelima. Metoda konačnih elemenata (MKE) ili engl. *Finite element method (FEM)* se primarno koristi kako bi se matematički opisalo elastično, a ako je moguće i plastično karakteristike mehaničkih sustava u kojima su masa i elastičnost jednoliko raspoređeni po tijelu.



Slika 19. Usporedba kompleksnosti pojedinih simulacijskih modela [25]

⁸ MBS – engl. *Multibody systems*

MKE se koristi za proučavanje utjecaja vanjskih sila i na deformaciju i raspodjelu naprezanja u tijelu. Kontinuirani sustavi (COS⁹) opisuju modele u kojima su ne samo elastičnost i masa, nego i plastičnost jednoliko raspoređeni kroz tijelo. MKE koristi obične diferencijalne jednačbe, dok COS koristi parcijalne diferencijalne jednačbe. MBS sustavi najprikladniji su za modeliranje kompleksnih modela upravo za opisivanje dinamike vozila. Ukoliko je potrebno odrediti deformacije struktura i naprezanja tada se može koristiti i MKE. Postoje još i hibridni sustavi koji su kombinacija MBS sustava i MKE. U tablici 6. dane su brzine izvođenja simulacija prema [27].

Tablica 6. Brzina izvođenja simulacija [27]

		Model s jednim tragom kotača		Model s dva traga kotača		MBS modeli	
		linearni	nelinearni	bez kinematike	s kinematikom	reducirani	kompleksni
Raspored	Komponenti	O/E	O/E	O/E	O/E	O/E	O
	Funkcija	O/E	O/E	O/E	O/E	O/E	O
Koncepti	Softver	O/E	O/E	O/E	O/E	O/E	O
	Hardver	E	E	E			
	HiL ¹⁰	E	E	E			
	SiL ¹¹	E	E	E			
Simulator vozila	Interakcija ovjeka i stroja	E	E	E	E		
	Istraživanje funkcija i algoritama	E	E	E	E		
	Primanje	E	E	E	E		
Integracija logaritama	Aplikacija u seriji	E					

Brzina izvođenja simulacije: O – offline, E – u realnom vremenu

Model kompletnog vozila sastoji se od podsustava:

- nosiva konstrukcija (karoserija, šasija, podvozje),
- pogonski sustav,
- ovjes vozila,
- kotači,
- kočnice,
- sustav upravljanja.

Ulazni parametri za takav model su položaj pedale kočnice i gasa, kut zakreta upravljača te stupanj prijenosa u kojem se vozilo kreće ili položaj ručice kod automatskih mjenjača. Također na takav sustav djeluje i okolina: vjetar, koeficijent prijanjanja na podlogu, neravnine na podlozi itd.

⁹ COS – engl. *Continuous Systems*

¹⁰ HiL – engl. *Hardware-in the loop*

¹¹ SiL – engl. *Software-in the loop*

Modeliranje gume je vrlo složeno zbog nehomogenosti sastava i nelinearnih karakteristika gume. Modeli gume prema [25] dijele se u ove kategorije: empirijski (Pacejka model), kvazi-empirijski (*Swift* model, *UniTire* model), fizikalni (*Brush* model, *Schell* model, *Fiala* model, *Ftire* model) i *FEM* (MKE) modeli. Za analizu dinamike vozila koriste se fizikalni modeli gume, *Brush* model i *Schell* model, koji pokrivaju frekvencijsko područje do 80 Hz. Za više detalja vidjeti literaturu [27].

3.3. Programski paketi

Danas je upotreba simulacija veoma raširena pa tako postoji i niz programskih paketa koji omogućavaju simuliranje dinamike vozila. Najčešće se koriste MBS modeli, pa su tako u tablici 7. navedeni klasični programski paketi koji imaju mogućnost simulacije MBS modelima, a uglavnom se koriste za općenite strojarске zadatke. Postoje također i programski paketi specijalizirani isključivo za simulaciju dinamike vozila. Takvi programski paketi osim modeliranja vozila, imaju mogućnost modeliranja okoline koja utječe na dinamiku vozila (profil podloge i dr.) te vozača (model vozača, engl. *driver model*). U tablici 8. navedeni su neki od takvih programskih paketa.

Tablica 7. Klasični MBD programski paketi (numerička formulacija) [25]

Programski paket	Proizvođač	Zasniva se na:	Dodatne informacije na:
Adams/Car	MSC Software Corporation	MBD	http://www.mscsoftware.com/product/adamscar
Simpack	SIMPACT AG	MBD	http://www.simpack.com/mbs-software-products.html
Virtual.Lab Vehicle Motion (DADS)	LMS	MBD	http://www.lmsintl.com/simulation/virtuallab/motion
Simulia	Dassault Systems	MBD, FEM	http://www.3ds.com/products/simulia
Dymola	Dassault Systems	MBD	http://www.3ds.com/products/catia/portfolio/dymola
PTC Creo (Pro/Engineer Mechanical)	PTC	MBD, FEM	http://www.ptc.com/industry/automotive

Tablica 8. Specijalizirani programski paketi za analizu dinamike vozila (simbolična formulacija) [25]

Programski paket	Proizvođač	Zasniva se na:	Dodatne informacije na:
CarMaker	IPG	MBD, RT, HIL	http://www.ipg.de
CarSIM	Mechanical Simulation Corporation	MBD, RT, HIL	http://www.carsim.com
veDyna	TESIS Dynaware	MBD, RT	http://www.thesis-dynaware.com
ASM	dSPACE	MBD, HIL	http://www.dspace.com
VDMS	Milliken Research	-	http://www.millikenresearch.com/vdms.html
SwRI Raptor	Southwest Research	HIL	http://www.swri.org/4org/d03/vehsys/advveh/raptor/default.htm
Madymo	TASS	MBD, FEM	http://www.tass-safe.com/en/products/madymo
Lotus Suspension Analysis	Lotus Cars Ltd	-	http://www.lotuscars.com/gb/engineering/engineering-software

3.4. Programski paket CarSim



Slika 20. Model vozila na trkačjoj stazi s različitim podlogama [28]

Programski paket CarSim tvrtke Mechanical Simulation Corporation jedan je od programskih paketa za analizu dinamike MBS modelima. Prema [29] CarSim koristi preko 110 OEM¹² proizvođača i dobavljača te više od 200 sveučilišta i ustanova diljem svijeta. Glavne karakteristike CarSim-a su:

- modeli vozila s više od 55 stupnjeva slobode,
- veliki broj ulaznih parametara,
- izbor između nekoliko modela guma (Pacejka, MF-Type, Ftire, MF-Swift), osim modela vozila, sadrži modele vozača, podloge i okoline,
- veliki broj gotovih ispitnih procedura te mogućnost izrade novih,
- mogućnost proširivanja modela u programskim jezicima Matlab/Simulink, C/C++ ili Visual Basic,
- vrlo brzo računanje, 10 puta brže nego u stvarno vremenu, te podržava HiL testove na platformama u stvarnom vremenu, te simulatore vožnje koji koriste CarSim kao izvor matematičkog modela vozila,
- uključuje preko 1900 strana dokumentacije koja pokriva korištenje softvera,
- sadrži veliku bazu podataka: 20 tipova vozila (ukupno 80 varijanti), te oko 200 primjera simulacija.



Slika 21. Proizvođači i vozila (OEM) koji koriste CarSim [27]

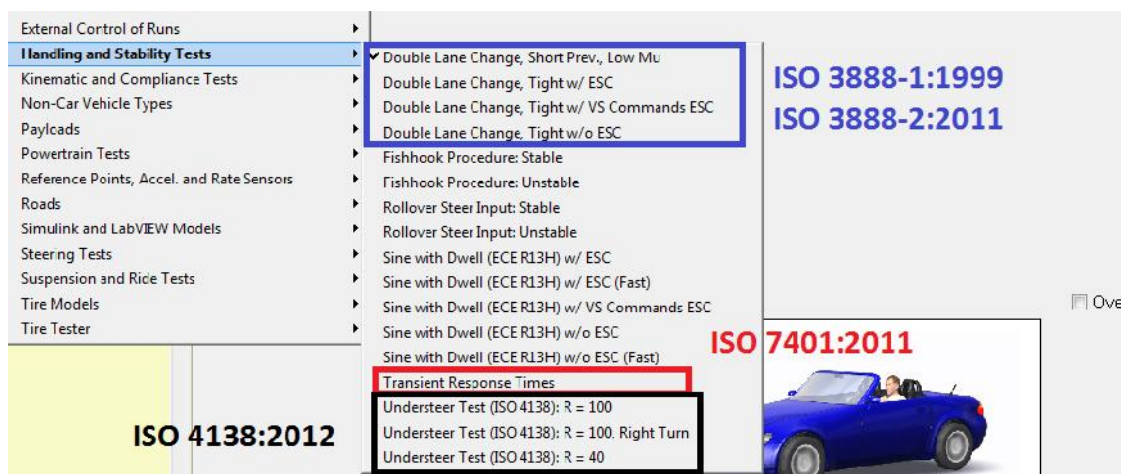
¹² OEM – engl. *Original equipment manufacturer* (proizvođači originalnih dijelova)

3.4.1. Standardne ispitne procedure u CarSim-u

CarSim sadrži oko 200 primjera simulacija, od kojih su većina standardne ispitne procedure. Od standardnih ispitnih procedura koje su spomenute u poglavlju 1.3 *Standardne ispitne procedure*, u CarSim-u su u potpunosti ili djelomično sadržane ove procedure:

- ISO 3888-1:1999 (slika 22.),
- ISO 3888-3:2011 (slika 22.),
- ISO 4138:2012 (slika 22.),
- ISO 7401:2011 (slika 22.),
- ISO 7975:2006,
- ISO 17288-1:2011,
- ISO 17288-1:2011.

Kako CarSim sadrži samo putnička osobna vozila, ovdje nisu razmatrane standardne ispitne procedure vezane uz teška komercijalna vozila. Tvrtka Mechanical Simulation Corporation je za te potrebe razvila poseban programski paket naziva TruckSim.



Slika 22. Standardne ispitne procedure u CarSim-u

4. PARAMETRI KOJI UTJE U NA PONAŠANJE VOZILA

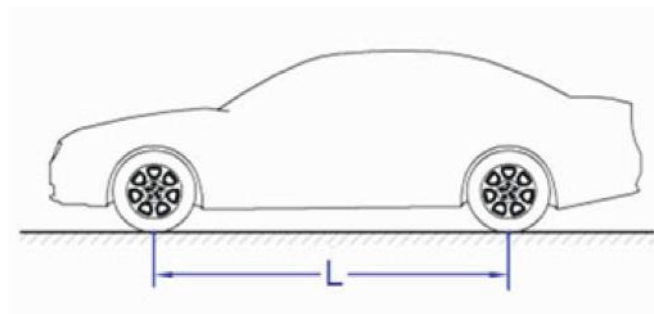
Na ponašanje vozila utje e veliki broj parametara, kako vozila tako i okoline. Ovdje e se razmatrati parametri vozila koji utje u na ponašanje vozila, tj. na njegovu upravljivost. U tablici 9. dani su neki od konstrukcijskih parametara vozila prema [1] koji mogu utjecati na upravljivost vozila. U ovom e se poglavlju dati objašnjena pojedinih konstrukcijskih parametara i njihov mogu utjecaj na upravljanje.

Tablica 9. Parametri koji utje u na upravljivost vozila [1]

Sustav	Parametar
Vozilo	osovinski razmak, širina traga kota a, raspodjela mase, položaj težišta, moment inercije karoserije dinami ka raspodjela optere enja naprijed/nazad (pod utjecajem pozitivnog odnosno negativnog ubrzanja) konfiguracija pogonskog sklopa i raspodjela momenta (4WD) aerodinamika vozila (velike brzine)
Ko nice	konstrukcijska ko nica, dimenzije, konfiguracija raspodjela sile ko enja konstrukcija i konfiguracija regulatora tlaka karakteristike ko nih obloga
Osovine i ovjes	konstrukcija i konfiguracija ovjesa konfiguracija i podešavanje opruga, stabilizatora, amortizera i dodatnih opruga kinematika i elastokinematika (uzdužne i popre ne sile skretanja) dinami ka raspodjela optere enja na kota u kinematika poniranja osovine (<i>anti-dive</i> , <i>anti-squat</i>) kinematika zakretanja osovine oko uzdužne osi (položaj centra zakretanja, <i>antiroll</i> opruge, dodatne opruge, stabilizatori i amortizeri) raspodjela zakretanja osovine oko uzdužne osi (naprijed/straga)
Kinematika kota a	uzdužni nagib osi kota a, krak stabilizacije, bo ni nagib osi zakretanja kota a, usmjerenost (trag) kota a, itd. putanja kretanja kota a (engl. <i>wheel travel</i>) i orijentacija kota a tijekom sabijanja i rastezanja
Sustav upravljanja	konstrukcija i konfiguracija sustava upravljanja i prijenosa stati ki i dinami ki prijenosni omjeri sustava upravljanja tipovi servoupravljanja i krivulje raspodjele specifi nih sila karakteristike upravljanja (momenti, prijenosni omjeri) elasti nost, inercije i prigušivanje unutar podvozja vozila sile u polugama ovjesa, polumjer zakretanja kota a, usmjerenost (trag) kota a, bo ni nagib osi zakretanja kota a konfiguracija kinemati ke povratne sile (uzdužni i bo ni nagib osi kota a)
Gume	dimenzije guma i kota a izgled površine nalijeganja krutost bo nog klizanja
Pogonski sklop	pozicija i orijentacija motora, mjenja a i njihovih nosa a elasti nost i prigušenje unutar pogonskog sklopa karakteristike motora prijenosni omjer mjenja a, karakteristike pretvara a momenta duljina i torzijska krutost vratila karakteristika blokiranja eg diferencijala karakteristika aktualizacije pritiskanja pedale gasa
Sustavi kontrole	Sustavi za kontrolu klizanja, ko enja i stabilnosti upravljanja su uobi ajenog konfigurirani od strane inženjera zaduženih za cijelo vozilo. Ovi sustavi zahtijevaju kompleksnu parametrizaciju i podešavanje. Ovo osobito dolazi do izražaja kada je više sustava umreženo da bi se stvorio integrirani sustav upravljanja šasijom.

4.1. Vozilo

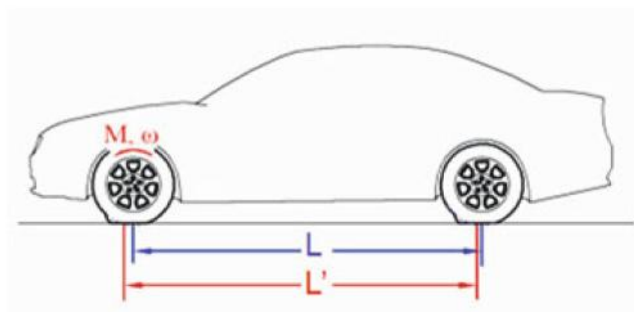
4.1.1. Me uosovinski razmak



Slika 23. Me uosovinski razmak – ISO 612 / DIN 70000 [1]

Me uosovinski razmak L (engl. *wheelbase*) je udaljenost između točaka kontakta prednjeg i stražnjeg kotača s podlogom, odnosno osi prednje i stražnje osovine gledano u XZ-ravnini. Kraći me uosovinski razmak vozila doprinosi boljoj okretljivosti vozila, a duži veća ojač stabilnosti po pravcu. Me uosovinski razmak također utječe na raspodjelu opterećenja na osovima. Kod dužih automobila, masa koja ispred prednje osovine je manja pa zakret vozila oko poprečne osi može biti smanjen.

Uobičajena vrijednost me uosovinskog razmaka se kreće prema [1] u rasponu od 2100 do 3500 mm, odnosno od 60 do 70 % ukupne duljine vozila. Generalna preporuka je da me uosovinski razmak bude što je veći i mogućiji.

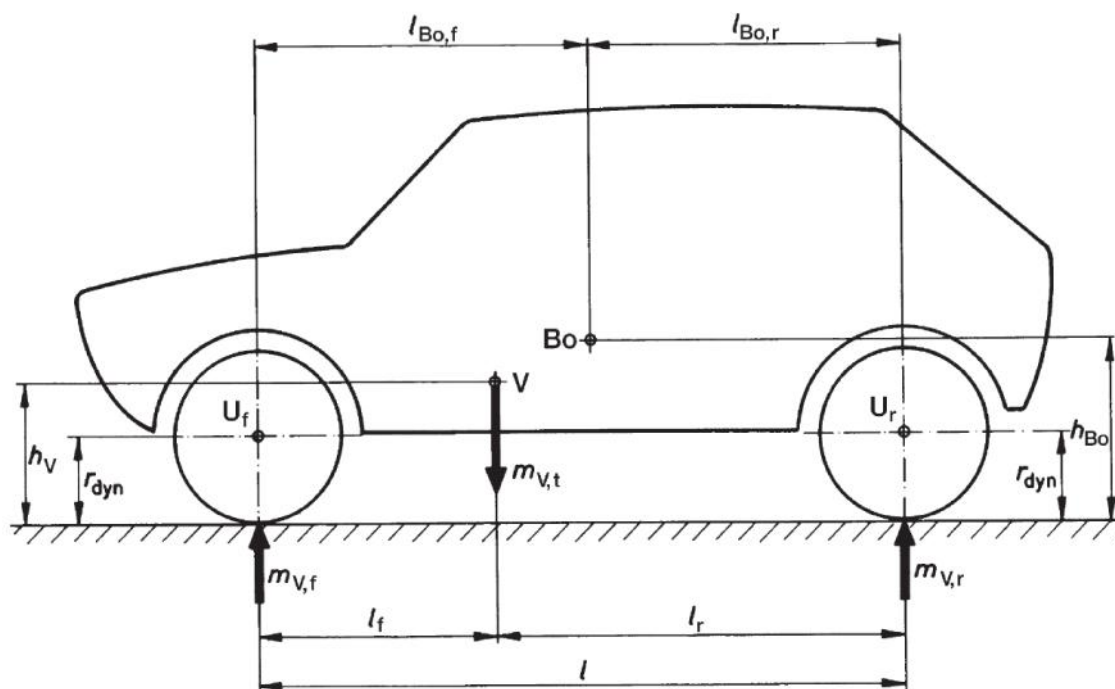


Slika 24. Promjena me uosovinskog razmaka tijekom hoda kotača [1]

Gibanje ovjesa vozila uzrokuje i hod kotača pa dolazi i do promjena duljine me uosovinskog razmaka (slika 24.). Uobičajeno je ta promjena prema [1] manja od 20 mm, a posljedice te promjene su:

- ublaženi horizontalni udari,
- gibanje opruga ovjesa je povećano,
- kolebanja brzine vrtnje kotača,
- torzijske vibracije u pogonskom sklopu,
- signali brzine vrtnje kotača mogu odstupati (ABS),
- mogući skok kotača tijekom kočenja.

4.1.2. Položaj težišta vozila



Slika 25. Položaj težišta ovješene mase B_0 (karoserija vozila) i težišta vozila V prema [7]

Prema [7] postoje tri važne varijable u ovom području strojarstva vozila:

- položaj težišta vozila V
- položaj težišta ovješene mase B_0
- osovinski (neovještene mase) položaj težišta, U_f i U_r

Položaj težišta utječe na veliki broj karakteristika vozila, među ostalim na [7]:

- sposobnost ubrzavanja, kočenja i svladavanja uspona
- konstrukciju ovjesa i pogona,
- stabilnost vozila
- momente inercije
- itd.

Poželjno je da težište vozila bude što niže što prema [1] doprinosi boljoj upravljivosti (svladavanje zavoja) i sigurnosti, te manjem zakretu oko poprečne (poniranje vozila) i uzdužne osi (prevrtanje vozila). Visoki smještaj težišta u vozilu dovodi to promjene opterećenja osovina kod svladavanja uspona i negativno utječe na nagnjanje vozila.

Položaj težišta vozila mijenja se s obzirom na opterećenje vozila putnicima odnosno prtljagom i to s obzirom na udaljenost od tla (visina težišta) i uzdužno udaljenost od prednje/stražnje osovine). Kod opterećenog vozila dolazi do približavanja karoseriju tlu odnosno visina (h_{B_0}) težišta ovješene mase se smanjuje. No zbog višeg težišta putnika ili prtljage na krovu automobila uobičajeno je da visina (h_V) težišta vozila u tom slučaju zapravo poraste.

4.1.3. Vrste pogona

Razlikuju se tri vrste pogona: stražnji (engl. *rear wheel drive* – *RWD*) i prednji (engl. *front wheel drive* – *FWD*) pogon te pogon na sve kota e (engl. *all wheel drive* – *AWD*).

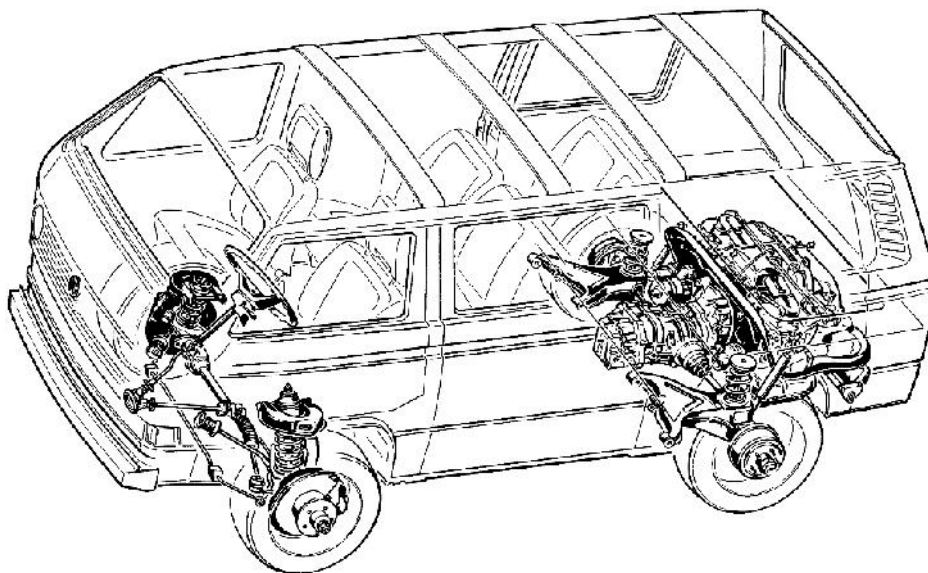
4.1.3.1. Stražnji pogon

Zna ajke pogona s motorom postavljenim sprijeda prema [7] i [32] su:

- povoljna raspodjela težine na prednju i stražnju osovinu,
- prednji kota i prenose velike bo ne sile vo enja jer na njih djeluju samo sile upravljanja,
- bolja realizacija performansi (ubrzanje, svladavanje uspona),
- pod punim optere enjem vozila, ve e je optere enje na stražnjoj pogonskoj osovini (bolja realizacija performansi kad je vozilo optere eno do granica nosivosti),
- pod djelomi nim optere enjem slabija realizacija performansi i upravljivost na podlogama s manjim koeficijentom trenja (mokra, skliska, snježna cesta),
- nestabilnost pri gibanju vozila po pravcu što se rješava geometrijom ovjesa.

Zna ajke pogona s motorom postavljenim straga prema [7] i [32] su:

- velika težina na stražnjoj osovini,
- preupravljanje vozila u zavojima,
- osjetljivost na bo ne udare vjetra,
- upravljanje vozilom tijekom prolaska kroz zavoj esto na granici stabilnosti
- teška upravljivost vozilom na ledenoj podlozi, zbog malog optere enja prednje osovine (podupravljanje).



Slika 26. VW Transporter, stražnji pogon s motorom postavljenim straga [7]

4.1.3.2. Prednji pogon

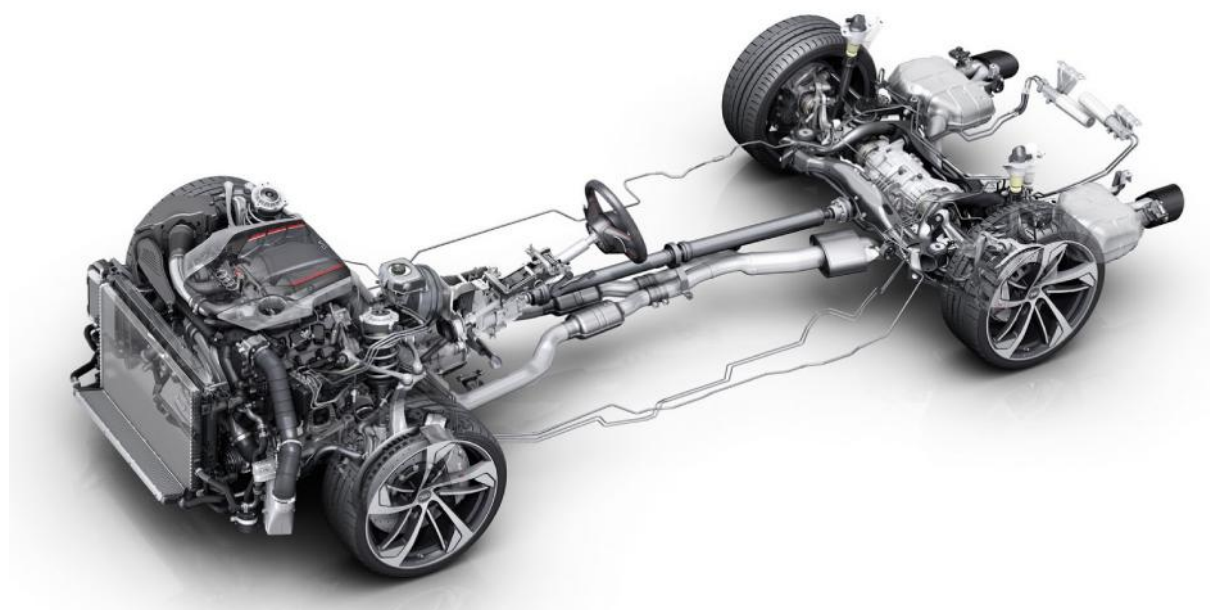
Zna ajke pogona s motorom postavljenim sprijeda prema [7] i [32] su:

- manje bo ne sile vo enja na prednjoj osovini zbog istodobnog djelovanja vu nih sila na kota ima,
- pri ubrzanju smanjuju se bo ne sile vo enja i vu ne sile zbog rastere ivanja prednjih kota a (lošija realizacija performansi),
- razli ite vu ne sile na pogonskim kota ima utje u zna ajno na upravljanje (motor smješten popre no – razli ite duljine pogonskih vratila kota a),
- dobro upravljanje na svim podlogama,
- sklonost podupravljanju,
- neosjetljivost na bo ne udare vjetra,
- manja masa.

4.1.3.3. Pogon na sve kota e

Pogon na sve kota e dijeli se u dvije kategorije: povremeni i stalni pogon na sve kota e. Zna ajke stalnog pogona prema [32] su:

- najbolja realizacija performansi (ubrzanje, svladavanje uspona itd.),
- velika stabilnost u vožnji, posebno u vožnji zavojima: zbog manjih vu nih sila na pojedinim kota ima, mogu se prenijeti ve e bo ne sile koje pridonose stabilnost i vo enju vozila (krug trenja),
- ve a masa i ve i gubici trenja
- bolje upravljanje i ve a stabilnost na svim podlogama u odnosu na ostale pogone, podjednaka raspodjela optere enja na osovinama
- smanjena osjetljivost na bo ne udare vjetra.



Slika 27. Pogonski sklop Audi-ja RS5 - stalni pogon na sve kota e [33]

4.2. Osovine i ovjes

4.2.1. Karakteristike opruga

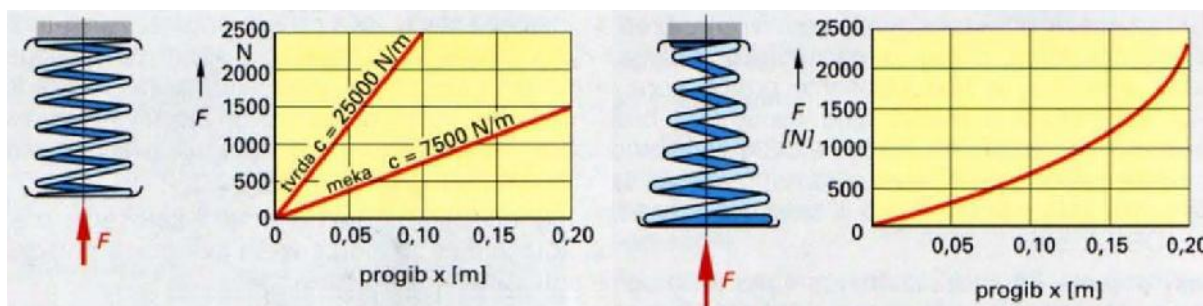
Elementi vibracijskog sustava su masa, opruga i prigušenje. Zadatak opruge je da djelovanjem s ostalim elementima ovjesa (amortizeri, stabilizatori) osigura neprekinuti kontakt kota s podlogom te ublaži udarce koji se prenose s kota na karoseriju. Sila u opruzi proporcionalna je produljenju ili skraćenju opruge:

$$F_o = c \cdot x, \quad [\text{N}]$$

Karakteristika opruge je krivulja koja prikazuje međusobnu ovisnost opterećenja i deformacije (progiba). U tablici 10. dane su vrste opruga i tipovi karakteristika.

Tablica 10. Vrste opruga i tipovi karakteristika [4]

Opruge		Karakteristika opruge c	Primjer
Linearne		krutost opruge je konstantna	obična spiralna opruga
Nelinearne	Progresivne	krutost opruge raste s opterećenjem	stožasta i bačvasta zavojna opruga, pneumatska opruga
	Degresivne	krutost opruge opada s opterećenjem	

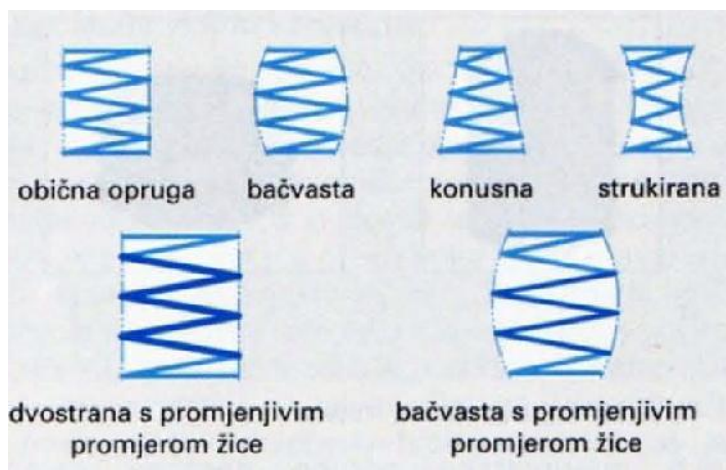


Slika 28. Linearna (lijevo) i progresivna (desno) karakteristika [4]

Opruge mogu biti mekane i tvrde. Progresivne opruge porastom opterećenja postaju tvrđe. Mekane zavojne opruge razlikuju se od tvrdih obično po manjem promjeru žice, većem unutarnjem promjeru opruge i većem broju i manjem usponu namotaja. S obzirom na svoja svojstva opruge imaju veliki utjecaj na upravljanje. Mogu smanjiti ili povećati kutove zakreta oko poprečne i uzdužne osi, isto kako i brzinu i ubrzanje oko svih triju osi, a što značajno utječe na upravljanje. Osim tradicionalnih elastičnih opruga, danas se koriste još i [7]:

- zračne i plinske opruge
- kompozitne (lisnate) opruge
- gumene opruge
- opruge od poliuretanskog elastomera
- hidropneumatske opruge

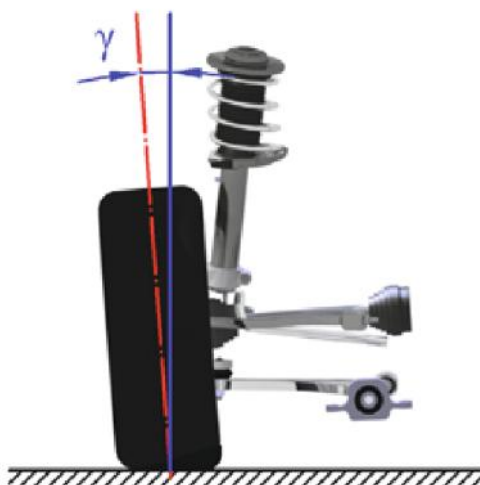
Za više detalja vidjeti literaturu [7].



Slika 29. Vrste torzijskih zavojnih opruga [4]

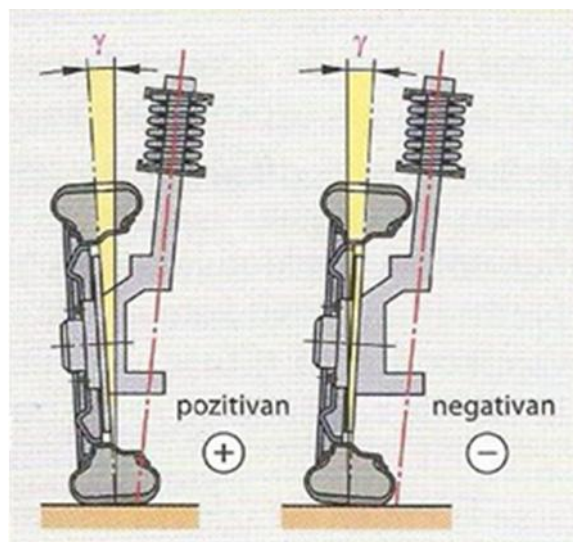
4.3. Kinematika kota a

4.3.1. Bo ni nagib kota a



Slika 30. Bo ni nagib kota a [1]

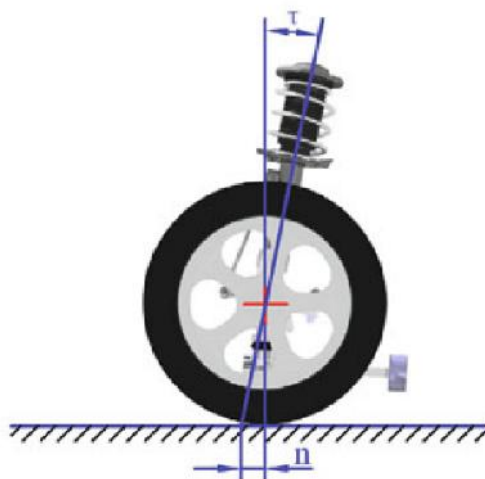
Bo ni nagib kota a γ (engl. *camber*) je kut izme u ravnine simetrije kota a i vertikalne uzdužne ravnine, gledano u YZ-ravnini vozila. Bo ni nagib kota a može biti pozitivan ili negativan (slika 31.). Kod pozitivnog nagiba kota a gornji dio kota a je nagnut prema van. Smanjuje se polumjer zakretanja pa se olakšava skretanje, tj. smanjuje se moment otpora zakretanja kota a. Tako er što je ve i pozitivni bo ni nagib kota a, to se više smanjuju bo ne sile vo enja u zavoju. Negativni bo ni nagib kota a nagine gornji dio kota a prema unutra. Poboljšava bo no vo enje u zavoju. Kut nagiba kota a ne smije biti prevelik, jer uzrokuje neravnomjerno i poja ano trošenje guma, pa se uobi ajeno vrijednosti kre u prema [1] od -2° do $+2^\circ$ za vozilo u neutralnom položaju. Pozitivan bo ni nagib prednjih kota a, a negativan stražnjih kota a pomaže postizanju upravljivosti. Tijekom skretanja na vanjskom kota u bi se trebao pove avati bo ni nagib kota a u negativnom smjeru, a na unutarnjem kota u u pozitivnom smjeru kako bi se prenijela maksimalna bo na sila. Pozitivni uzdužni nagib osi kota a doprinosi pove anju tog efekta.



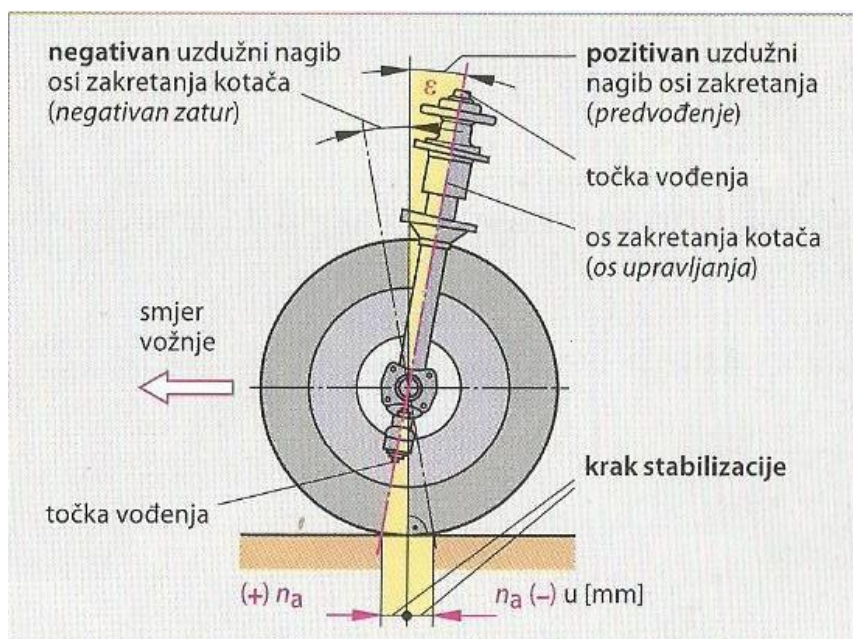
Slika 31. Pozitivni i negativni bojni nagib kota [4]

4.3.2. Uzdužni nagib osi zakretanja kota α i mehanički predvođenje

Uzdužni nagib osi zakretanja kota α (engl. *caster*) je kut između osi zakretanja kota i vertikalne poprečne ravnine, gledano u XZ-ravnini vozila. Mehaničko (geometrijsko) predvođenje n (engl. *caster trail*) je horizontalna uzdužna udaljenost probodišta osi zakretanja kota i središta kontaktne površine gume u ravnini gume i podloge, gledano u XZ-ravnini vozila. Naziva se još i krak stabilizacije [4].

Slika 32. Uzdužni nagib osi kota α i mehaničko predvođenje [1]

Kod pozitivnog (slika 33.) uzdužnog nagiba osi kota α (kota zaostaje) točka dodira kota s podlogom nalazi se iza sjecišta osi zakretanja kota s podlogom, a kod negativnog (kota prethodi) ispred sjecišta. Kod stražnjeg pogona, pozitivni nagib na prednjim kota ima pomaže držanju smjera i ispravljanju kota, dok kod prednjeg pogona, povećava nestabilnost vožnje u zavoju. Negativni uzdužni nagib smanjuje povratne sile i sprečava prebrzo vraćanje kota u središnji položaj nakon izlaska iz zavoja.



Slika 33. Pozitivni i negativni uzdužni nagib i mehani ko predvo enje [4]

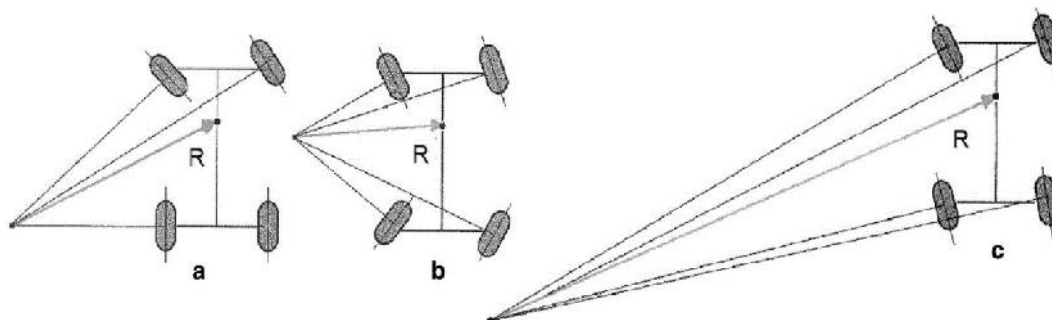
Shodno tome predvo enje (pozitivni krak stabilizacije n) doprinosi vo enju po pravcu, pa se vozilo ponašanja sli no kao kolica za trgovine. Uzrok tomu su bo ne sile koje djeluju u sjecištu osi i stvaraju moment kojim zakre u kota . Predvo enje tako er negativno djeluje na ponašanje vozilo tijekom naleta bo nog vjetra, te pove ava osjetljivost na neravnine podloge odnosno uzrokuje udare (trenutni moment) na upravlja u prilikom naleta na izbo inu/udubinu na podlozi tijekom skretanja. U tablici 11. dane su uobi ajeni rasponi vrijednosti uzdužnog nagiba i mehani kog predvo enja u vozilima prema [1].

Tablica 11. Rasponi vrijednosti uzdužnog nagiba i mehani kog predvo enja [1]

Uzdužni nagib osi zakretanja kota a	
Motor smješten naprijed i pogon na zadnje kota e	1 do 10°
Motor smješten straga i pogon na zadnje kota e	3 do 15°
Motor smješten naprijed i pogon na prednje kota e	1 do 5°
Mehani ko predvo enje	
Sa servoupravljanjem	0 mm
Bez servoupravljanja	10 do 40 mmm

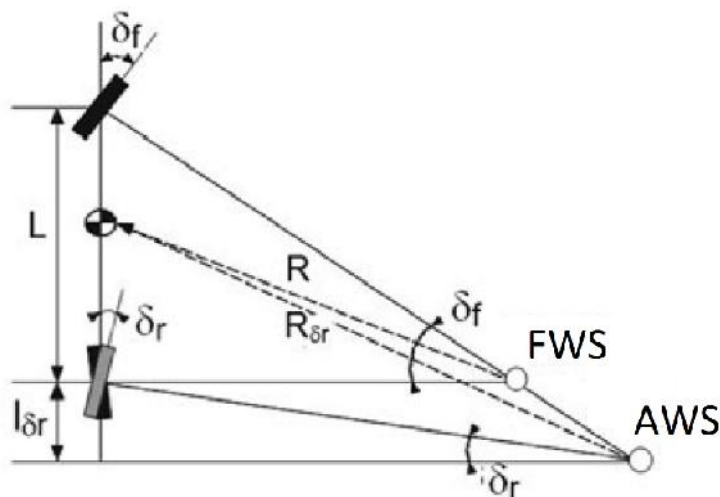
4.4. Sustav upravljanja

4.4.1. Upravljanje svih kota a (AWS¹³)



Slika 34. Upravljanje: a) prednjim kota ima, b) prednjim i stražnjim u suprotnom smjeru, c) prednjim i stražnjim u istom smjeru [31]

Upravljanje svih kota a može poboljšati dinamiku vozila i to na dva načina. Ukoliko stražnji kota i skreće u suprotno od prednjih kota a smanjuje se polumjer zakretanja vozila tj. poboljšava se okretnost vozila (parkiranje, prolasci kroz zavoje). Drugi način je poboljšanje stabilnosti zakretanjem prednjih i stražnjih kota a u istom smjeru.

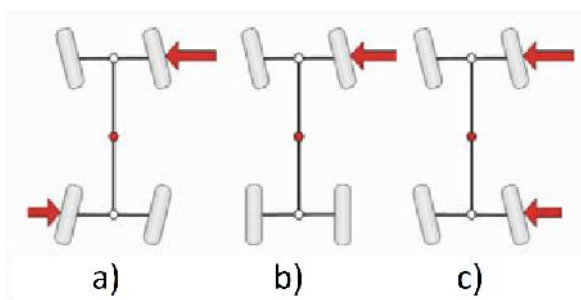


Slika 35. Pomak središta zakretanja vozila u odnosu na FWS¹⁴ [1]

Središte zakretanja vozila se pomiče prema nazad u odnosu na vozilo s upravljanjem samo prednjih kota a. Time se virtualno povećava međuosovinski razmak (povećan polumjer zakretanja vozila, slika 34, 35.) što povećava dinamiku stabilnosti. Borne sile koje se stvaraju na prednjem i stražnjem kota u djeluju u istom smjeru (slika 40. c)), no stvaraju suprotne momente pa je moment oko vertikalne osi vozila znatno manji čime se doprinosi stabilnosti. Kod skretanja stražnjih kota a u suprotnom smjeru od prednjih efekt je suprotan. Tada se stvaraju suprotne borne sile na kota ima (slika 36. a)), koje onda zajedno stvaraju moment oko vertikalne osi koji omogućava lakše zakretanje vozila. Ubrzanje u poprečnom smjeru najprije sporo raste, a zatim postiže više vrijednosti od standardnog vozila, kao i kutna brzina oko vertikalne osi, ali koja ima mnogo brži rast funkcije. Kod vozila sa skretanjem stražnjih kota a u istu stranu vrijedi obrnuto, ubrzanje raste brzo, ali je maksimalna vrijednost manja, a kutna brzina ima manji preboj i sporiji rast.

¹³ AWS – eng. *all wheel steering*, upravljanje svih kota a

¹⁴ FWS – eng. *front wheel steering*, upravljanje prednjih kota a



Slika 36. Bo ne sile, upravljanje: a) prednjim i stražnjim u suprotnom smjeru, b) prednjim kota ima, c) prednjim i stražnjim u istom smjeru [1]

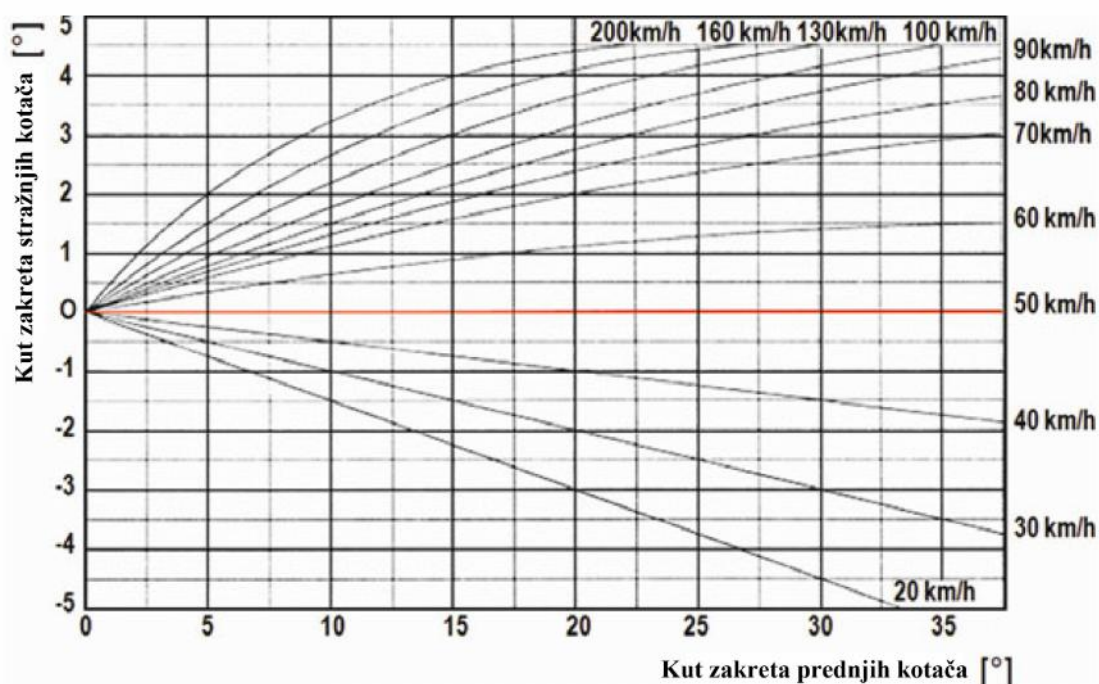
Zakretanje kota a u suprotnom smjeru primjenjuje se kod manjih brzina kretanja vozila, dok se zakretanje kota a u istom smjeru primjenjuje kod većih brzina (promjena pravca kretanja itd.). Iznos kuta zakreta stražnjih kota a se kreće prema [1] od 0,5 do 6°. Upravljanje zakretanjem se vrši uz pomoć senzora koji mjere kut zakreta upravljača, odnosno kut zakreta prednjih kota a, te brzine vozila te shodno tome uskladiju zakretanje stražnjih kota a prema formuli:

$$\delta_r = k_p \cdot \delta_f,$$

pri čemu koeficijent k_p upravo ovisi o tim varijablama (tablica 12.). Slika 37. prikazuje primjer krivulja prijenosnih omjera upravljanja svih kota a.

Tablica 12. Koeficijent k_p [1]

$k_p > 0$	Skretanje prednjih i stražnjih kota a u istom smjeru
$k_p = 0$	Bez skretanja stražnjih kota a
$k_p < 0$	Skretanje prednjih i stražnjih kota a u suprotnom smjeru



Slika 37. Krivulje prijenosnih omjera upravljanja svih kota a [1]

5. PRIPREMA MODELA I PROVEDBA SIMULACIJE

5.1. Priprema modela vozila

U programskom paketu CarSim provest će se simulacija standardnih ispitnih procedura navedenih u uvodnom dijelu *1.3 Standardne ispitne procedure* odnosno u *2 Standardne ispitne procedure*.



Slika 38. SUV vozila [34][35]

U Europu se, pa tako i u Hrvatsku, iz SAD-a prenio trend SUV¹⁵-ova (slika 38.), čiji je broj na cestama u porastu stoga su upravo ova vozila odabrana za simulaciju. Odabrana je srednja klasa SUV vozila, u CarSim nazvana D-Class (slika 39.). U odnosu na izvorno vozilo iz programa CarSim unesene su promjene:

- motor manje snage: 125 kW,
- pogon na prednje kotač e umjesto pogona na sve kotač e.

U daljnjem tekstu se na ovo vozilo referira kao na izvorno vozilo.

[No Dataset]		
[Copy and Link Dataset]		
Baja SAE	▶	
CS D-Class	▶	D-Class, SUV - #1 FWD D-Class, SUV - LOAD #1
CS D-Class Ostalo	▶	D-Class, SUV - #2 RWD D-Class, SUV - LOAD #2
CS E-Class	▶	D-Class, SUV - #3 4WD D-Class, SUV - LOAD #3
CS GT	▶	D-Class, SUV - AWS #1 D-Class, SUV - LOAD #4
CS Pickup, Compact	▶	D-Class, SUV - AWS #2 D-Class, SUV - LOAD #5
CS Pickup, Full Size	▶	D-Class, SUV - AWS #3 D-Class, SUV - opruge 1
CS SUV, Full Size	▶	D-Class, SUV - AWS #4 D-Class, SUV - opruge 2
FSAE	▶	D-Class, SUV - AWS #5 D-Class, SUV - opruge 3
		D-Class, SUV - camber 1 D-Class, SUV - opruge 4
		D-Class, SUV - camber 2 D-Class, SUV - opruge 5
		D-Class, SUV - camber 3 D-Class, SUV - wheelbase-1
		D-Class, SUV - caster 1 D-Class, SUV - wheelbase-2
		D-Class, SUV - caster 2 D-Class, SUV - wheelbase-3
		D-Class, SUV - caster 3 D-Class, SUV - wheelbase-4
	✓	D-Class, SUV - caster 4 D-Class, SUV - wheelbase-5

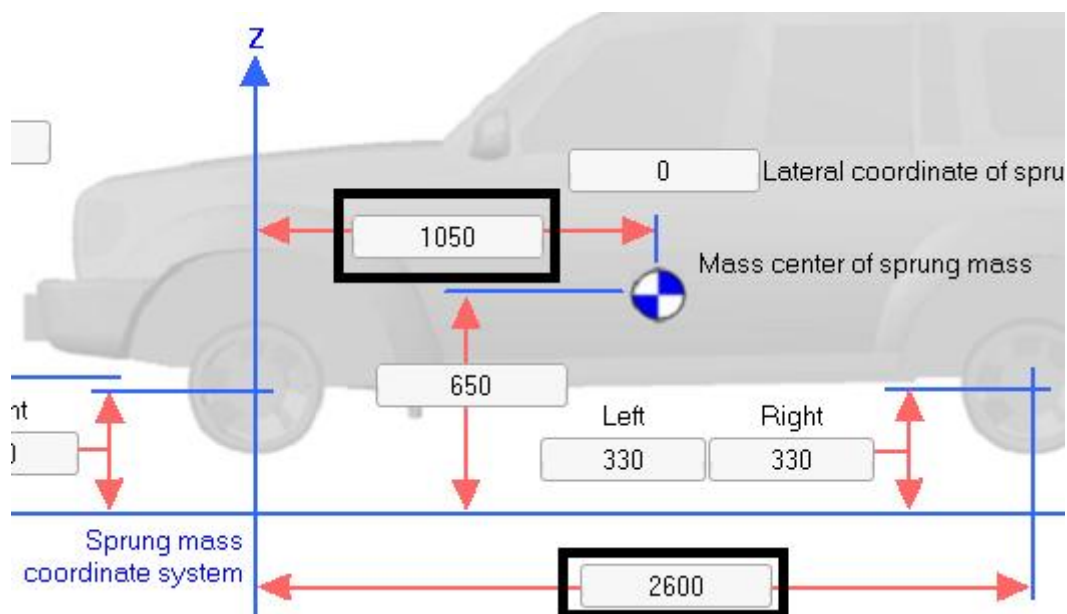
Slika 39. Izra ena vozila za potrebe simulacije

¹⁵ SUV – engl. *sport utility vehicle*, sportsko rekreacijsko vozilo

Od parametara navedenih u poglavlju 4. *Parametri koji utječu na ponašanje vozila* nasumično su odabrani su sljedeći:

- od parametara kinematike kota α :
 - bojni kut nagiba kota α ,
 - uzdužni nagib osi zakretanja kota α ,
- od parametara vozila:
 - mešovinski razmak,
 - vrsta pogona,
 - razmještaj tereta/putnika u vozilu,
- od parametara sustava upravljanja:
 - upravljanje prednjih ili upravljanje svih kota α ,
- a od parametara osovina i ovjesa:
 - krutost opruga.

Rasponi vrijednosti birani su prema izvornom vozilu iz CarSim-a i prema literaturi (rasponi vrijednosti su navedeni i u ovom radu; poglavlje 4.). Za parametre bojni nagib kota α i vrsta pogona odabrane su po 3 vrijednosti te za parametar uzdužni nagib osi zakretanja kota α 4 vrijednosti dok je za ostale parametre odabrano po 5 vrijednosti (slika 39., tablica 13.). Vozila 1.1, 2.1, 3.1, 5.1, 6.1 i 7.1 zapravo su identična vozila, tj. označavaju izvorno vozilo iz programa CarSim. Kod vozila kojima je promijenjena vrijednost parametra mešovinski razmak, u istom omjeru je promijenjena i udaljenost težišta od prednje osovine kako bi se smanjio mogući utjecaj promjene težišta na rezultate simulacija (slika 40.). Stoga je u tablici 13. uz vrijednosti mešovinskog razmaka u zagradi prikazana i udaljenost težišta od prednje osovine.

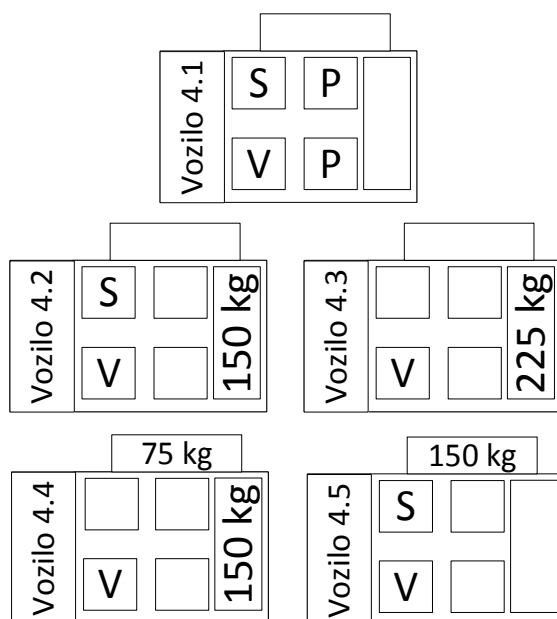


Slika 40. Položaj težišta i mešovinski razmak vozila u CarSim-u

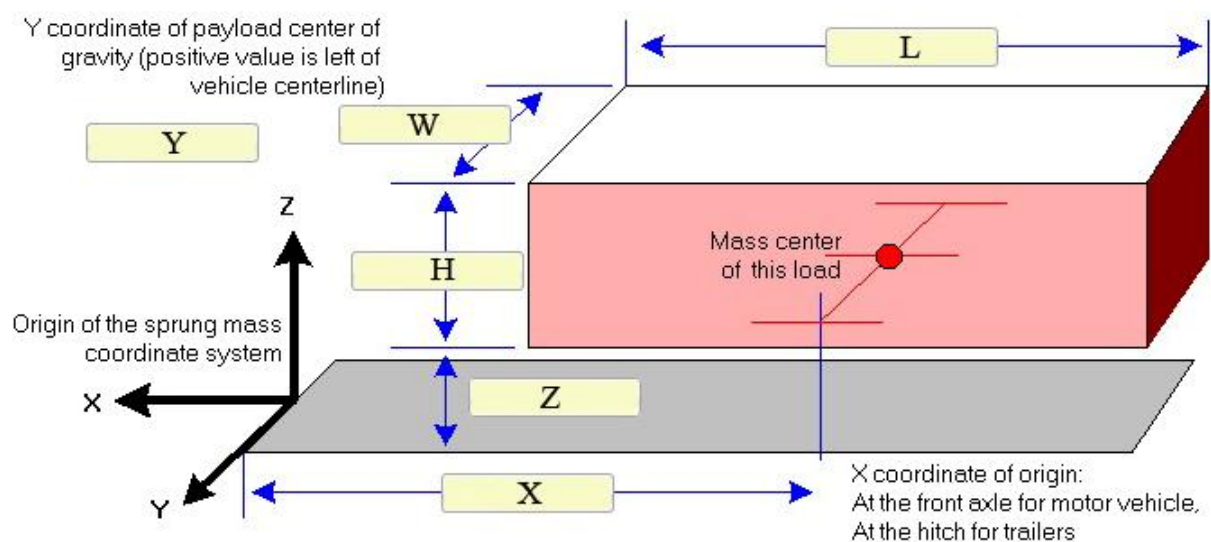
Za parametar razmještaj tereta/putnika vozilima je dodana je masa vozača (75 kg; oznaka: V) te masa putnika pojedinačne mase 75 kg (suvozač – oznaka: S; putnik – oznaka: P) ili teret u prtljažniku (oznaka: B) ili tereta na krovu (oznaka: K). Svako vozilo opterećeno je istim iznosom mase (slika 41.), tj. masom od 300 kg.

Tablica 13. Odabrana vozila

Parametar/ Vozilo	Bo ni nagib kota a	Uzdužni nagib osi zakretanja kota a	Me uoso- vinski razmak	Razmještaj tereta/putnika	Upravljanje prednjih ili svih kota a	Krutost opruga	Vrsta pogona
	(°)	(°)	(mm)	S/P/B/K	FWS/AWS	(N/mm)	FWD/RWD/4WD
1.1	+2°	9,5°	2600 (1050)	/	FWS	130/40	FWD
1.2	0°	9,5°	2600 (1050)	/	FWS	130/40	FWD
1.3	-2°	9,5°	2600 (1050)	/	FWS	130/40	FWD
2.1	+2°	9,5°	2600 (1050)	/	FWS	130/40	FWD
2.2	+2°	5°	2600 (1050)	/	FWS	130/40	FWD
2.3	+2°	0°	2600 (1050)	/	FWS	130/40	FWD
2.4	+2°	15°	2600 (1050)	/	FWS	130/40	FWD
3.1	+2°	9,5°	2600(1050)	/	FWS	130/40	FWD
3.2	+2°	9,5°	2210 (893)	/	FWS	130/40	FWD
3.3	+2°	9,5°	2405 (971)	/	FWS	130/40	FWD
3.4	+2°	9,5°	2795(1129)	/	FWS	130/40	FWD
3.5	+2°	9,5°	2990(1208)	/	FWS	130/40	FWD
4.1	+2°	9,5°	2600 (1050)	S+2xP	FWS	130/40	FWD
4.2	+2°	9,5°	2600 (1050)	S+B(150kg)	FWS	130/40	FWD
4.3	+2°	9,5°	2600 (1050)	B (225kg)	FWS	130/40	FWD
4.4	+2°	9,5°	2600 (1050)	B(150kg) +K(75kg)	FWS	130/40	FWD
4.5	+2°	9,5°	2600 (1050)	S+ K(150kg)	FWS	130/40	FWD
5.1	+2°	9,5°	2600 (1050)	/	FWS	130/40	FWD
5.2	+2°	9,5°	2600 (1050)	/	AWS(+30)	130/40	FWD
5.3	+2°	9,5°	2600 (1050)	/	AWS(+20)	130/40	FWD
5.4	+2°	9,5°	2600 (1050)	/	AWS(-30)	130/40	FWD
5.5	+2°	9,5°	2600 (1050)	/	AWS(-20)	130/40	FWD
6.1	+2°	9,5°	2600 (1050)	/	FWS	130/40	FWD
6.2	+2°	9,5°	2600 (1050)	/	FWS	100/30	FWD
6.3	+2°	9,5°	2600 (1050)	/	FWS	65/20	FWD
6.4	+2°	9,5°	2600 (1050)	/	FWS	160/50	FWD
6.5	+2°	9,5°	2600 (1050)	/	FWS	195/60	FWD
7.1	+2°	9,5°	2600 (1050)	/	FWS	130/40	FWD
7.2	+2°	9,5°	2628 (1050)	/	FWS	130/40	RWD
7.3	+2°	9,5°	2629 (1050)	/	FWS	130/40	4WD



Slika 41. Razmještaj tereta/putnika u vozilu



Slika 42. Smještaj tereta/putnika unutar koordinatnog sustava vozila

Tablica 14. Smještaj tereta/putnika unutar koordinatnog sustava vozila

	Masa (kg)	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	H (mm)	W (mm)	L (mm)
Vozač	75	1500	425	550	950	400	300
Suvozač	75	1500	-425	550	950	400	300
Putnika iza vozača	75	2200	425	550	950	400	300
Putnika iza suvozača	75	2200	-425	550	950	400	300
Krov	75/150	2200	0	1850	260	750	1750
Prtljažnik	150/225	2950	0	850	450	1000	750

Slika 42. prikazuje smještaj putnika ili tereta u koordinatnom sustavu vozila ije je ishodište u prednjoj osovine, a ravnina XY prolazi uzdužnom sredinom vozila. U tablici 14. dane su veličine prikazane na slici 42., a koje su me u ostalim koordinate u koordinatnom sustavu te približne dimenzije tereta/putnika.

Steering Column Properties

Column inertia:	0.02	kg-m ²
System inertia:	0.00015	kg-m ²
Column damping:	0.01	Nm-s/deg
Column hysteresis:	0.1	Nm
Hysteresis ref. angle:	0.5	deg

Calculate torque from kingpin moments

Kingpin Geometry

	Left-Front	Right-Front	
Lateral offset @ center:	77.0	77.0	mm
Kingpin inclination:	12.5	12.5	deg
X coord. of KP @ center:	5.0	5.0	mm
Caster angle:	9.5	9.5	deg

	Left-Rear	Right-Rear	
Lateral offset @ center:	77	77	mm
Kingpin inclination:	12.5	12.5	deg
X coord. of KP @ center:	5	5	mm
Caster angle:	0	0	deg

Front View **Side View**

Kingpin inclination angle, Caster angle, Kingpin lateral offset, Steering axis

Rear Steering System Type

Rear: rack and pinion

Constant rack & pinion ratio

C factor: 30 mm/rev

Rack to rear wheels: Steer kinematics

Pickup, Full Size - Rear Steering

Speed-Sensitive Rear Steering Gain

Rear steering gain: Steer Gain vs. Speed

Variable Phase

Rear compliance: Steering compliance

0.002 deg/N-m

Rear steering damping: 4 N-s/mm

Rear wheels: Parking Torque

Zero

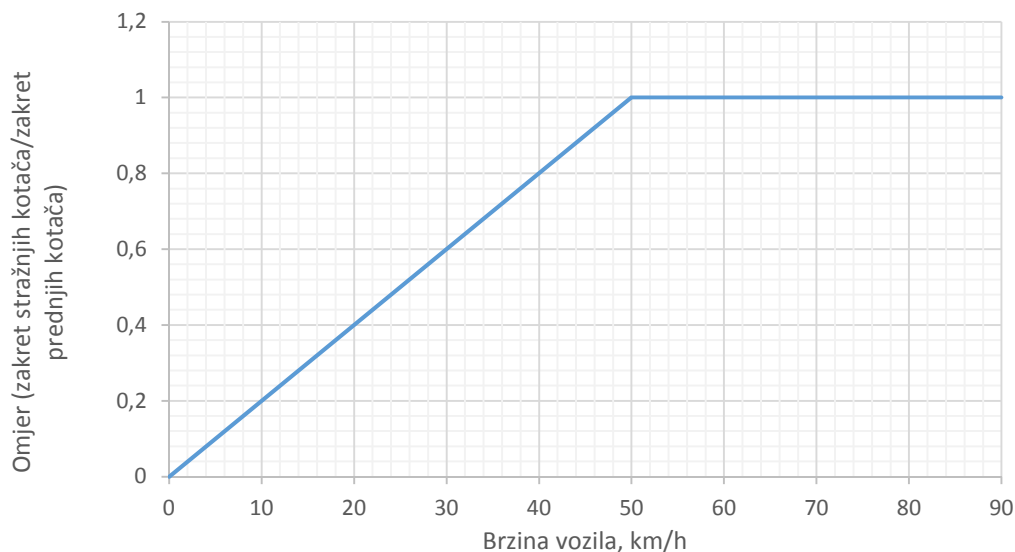
Rear boost force: Power assist force

Symetrical, Speed Sensitive High Boost Curve

Slika 43. Postavke vozila s upravljanjem svim kota ima

Vozila pod rednim brojem 5. razlikuju se po upravljanju svim ili samo prednjim kota ima, pri čemu je vozilo 5.1 vozilo s upravljanjem samo na prednjim kota ima, dok su ostala vozila s upravljanjem na svim kota ima. U tablici 13. je uz vrstu upravljanja označena vrijednost pomaka zupčaste letve na stražnjim kota ima za jedan okretaj zupčanika tj. tzv. C faktor, a koji se označava s C (mm/rev). Promjenom te veličine variran je kut zakreta na stražnjim kota ima. Pozitivni predznak u tablici 13. uz C faktor označava zakret prednjih i stražnjih kota a u istom smjeru, a negativni u suprotnom smjeru od prednjih kota a.

Na slici 43. prikazan je izbornik u CarSim-u u kojem se definira upravljački sustav i njegova geometrija. Crnim okvirom označene su unesene promjene u odnosu na standardno vozilo: lijevo, parametri stražnje osovine i desno, kinematika upravljačkog sustava. Na standardnom vozilu vrijednosti parametara stražnje osovine, polumjer zakretanja kota a (*Lateral offset*), bojni nagib osi zakretanja kota a (*Kingpin inclination*) te x – koordinata osi zakretanja kota a (*X coord. of KP @ center*) bili su jednaki nula. Na vozilu s upravljanjem svim kota ima te vrijednosti su promijenjene u vrijednosti prikazane na slici 43. Po uzoru na literaturu [1] odabran je promjenjiv kut zakreta stražnjih kota a (na slici 43.; *Rear steering gain: Steer Gain vs. Speed: Variable phase*), tj. iznos kuta zakreta stražnjih kota a ovisan je o brzini kretanja vozila.



Slika 44. Funkcija promjene kuta zakreta stražnjih u odnosu na prednje kotače

Takvo ponašanje opisano je funkcijom omjera zakreta prednjih i stražnjih kotača u ovisnosti o brzini kretanja vozila prikazanoj na slici 44. Može se uočiti da se omjer skretanja raste do 50 km/h, a poslije toga je konstantan što znači da stražnji kotači uvijek skreću u odabranom smjeru skretanja ovisno o tome da li je C faktor pozitivan ili negativan. Iako je u literaturi [1] preporučena funkcija kao na slici 37. (pri manjim brzinama omjer treba biti negativan, tj. da stražnji kotači skreću u suprotnom smjeru, a pri većim pozitivan – kotači skreću u istu stranu) ovdje je funkcija izvedena na ovaj način kako bi se moglo direktno usporediti obje vrste upravljanja (skretanje stražnjih kotača u istom ili suprotnom smjeru od prednjih). Ovo će imati zanemariv utjecaj na standardne ispitne procedure jer vozila trebaju održavati konstantnu brzinu kretanja s izuzetkom simulacije ispitivanja vozila na trkačkoj stazi.

Krutost opruga je za vozila pod rednim brojem 6. promijenjena u odnosu na standardno vozilo naprijed i straga za $\pm 25\%$ odnosno za $\pm 50\%$, pri čemu prva vrijednost u tablici 13. označava krutost opruga na prednjoj osovini, a druga vrijednost na stražnjoj osovini.

Na dijagramima plava boja označava izvorna vozila (npr. vozilo 1.1, 2.1, ...), crvena boja označava drugu varijaciju vrijednosti parametra vozila (npr. vozilo 1.2, 2.2, ...), crna boja treću varijaciju (npr. vozilo 1.3, 2.3, ...), narančasta četvrtu varijaciju (npr. vozilo 2.4, 3.4, ...) te smeđa boja petu varijaciju vozila (npr. vozilo 3.5, 4.5, ...; vidi tablica 13.). Plava boja u tablicama (izuzev tablica 13.) označava poboljšanje karakteristike u odnosu na izvorno vozilo, a crvena boja pogoršanje.

5.2. Priprema standardnih ispitnih procedura

Iz poglavlja 1.4 *Standardne ispitne procedure* odnosno poglavlja 2 *Standardne ispitne procedure* za provođenje simulacije odabrane su sljedeće ispitne procedure:

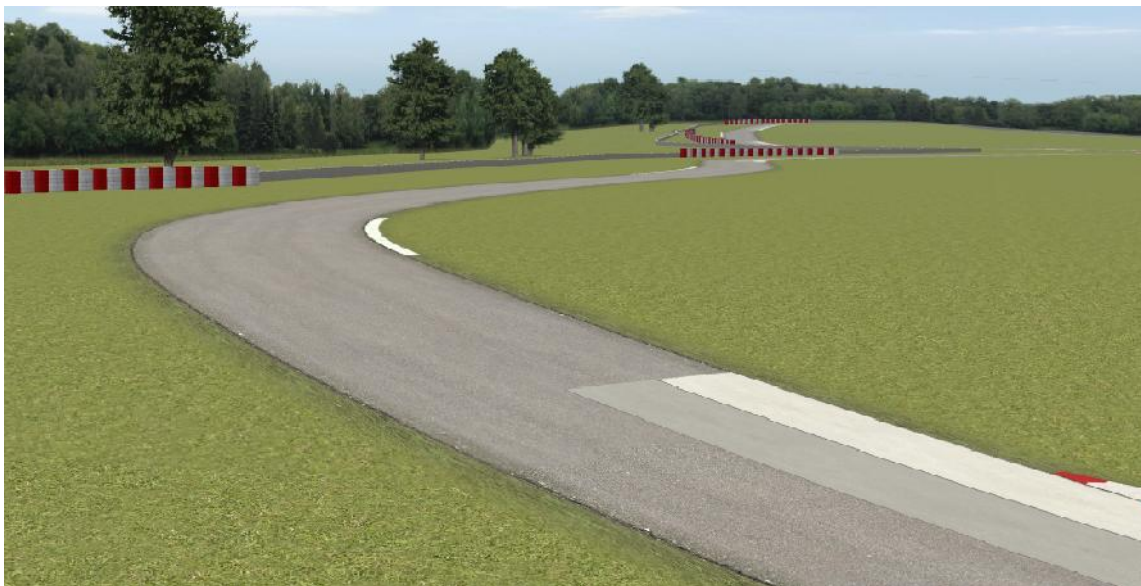
- ISO 3888-1:1999 Dvostruka izmjena pravca [12]
- ISO 7401:2011 Ispitivanje božnjog prijelaznog odziva [18]
- ISO 13674-1:2010 Test krivudanjem [19]

5.3. Provedba simulacije

Ukupno je za potrebe ovog rada izrađeno 30 vozila koje je ponašanje simulirano u 3 standardne ispitne procedure, tj. provedeno je ukupno 90 simulacija. Uz to biti će provedene još dodatne 4 simulacije, pri čemu će biti izrađena još 4 vozila. Ta vozila će biti izmijenjena na sljedeće načine:

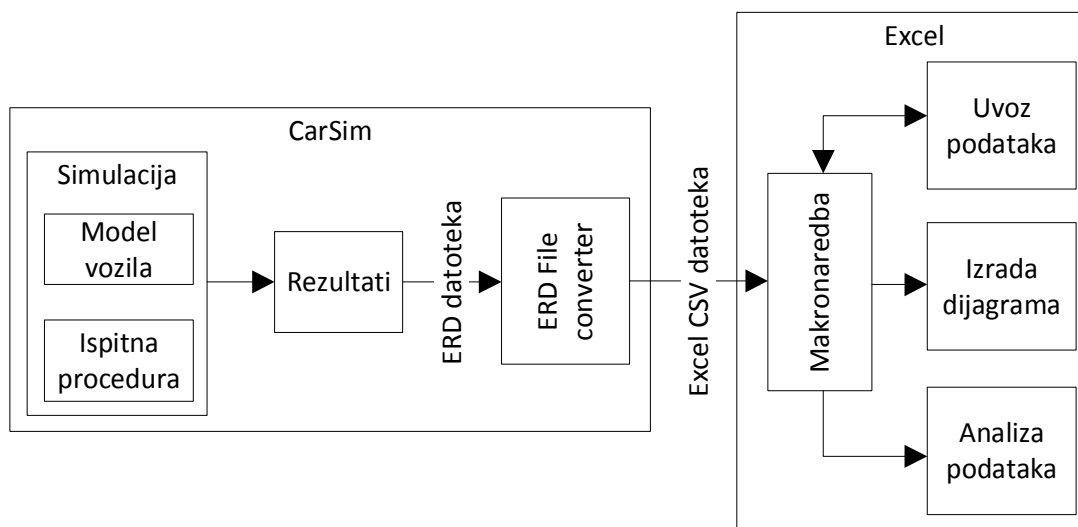
- kao kombinacija vrijednosti parametara koje dovele do poboljšanja upravljanja u ispitnim procedurama, bez opterećenja masom,
- kao kombinacija vrijednosti parametara koje dovele do pogoršanja upravljanja u ispitnim procedurama, bez opterećenja masom,
- kao kombinacija vrijednosti parametara koje dovele do poboljšanja upravljanja u ispitnim procedurama, sa najpovoljnijim razmještajem putnika/tereta,
- kao kombinacija vrijednosti parametara koje dovele do pogoršanja upravljanja u ispitnim procedurama, sa najnepovoljnijim razmještajem.

U tim simulacijama provjeravati će se ponašanje vozila na kružnoj trkačkoj stazi duljine 2274 m, tj. vremenska razlika između vozila nakon odvoženog jednog kruga.



Slika 45. Kružna trkačka staza u programskom paketu CarSim

6. OBRADA REZULTATA



Slika 46. Dijagram toka podataka

Zbog velikog broja provedenih simulacija (vidi poglavlje 5.3 *Provedba simulacije*) obrada rezultata je provedena u aplikaciji Excel iz programskog paketa Microsoft Office. CarSim pohranjuje rezultate simulacija kao kombinaciju ERD datoteke i BIN datoteke. BIN datoteka služi samo kao podrška, dok je ERD glavna datoteka i sadrži sve važne informacije. Pomo u aplikacije ERD File Converter koja je ugrađena u CarSim moguće je informacije iz ERD datoteke zapisati u tzv. Excel CSV¹⁶ datoteke. CSV datoteka je Excel datoteka u kojoj su vrijednosti svih veličina pohranjene u prvi stupac tabele, a međusobno su odvojene zarezima. Pomo u makronaredbi, programiranim u VBA¹⁷, Excel automatski preuzima podatke iz predodređenih CSV datoteka, te ih slaže u jednu Excel datoteku, a zatim ih sortira po traženim karakteristikama u listove, te potom iz njih izrađuje dijagrame. Unaprijed je izrađen jedan nepromjenjiv list koji služi za analizu podataka, tj. u njemu se pomoću funkcija (npr. MAX, MIN, VLOOKUP, INDEX i sl.) dobivaju potrebni podaci za ocjenjivanje ponašanja vozila, a svakim novim uvozom podataka se osvježavaju.

```

Workbooks.Open ("C:\Users\Public\Documents\CarSim_Data - #2 - Dipl - Radna _
verzija\Runs\Run322_DLC_AWS.csv")

Y = 1
X = 1

Do Until Cells(1, Y).Value = ""
    Do While Cells(X, Y).Value <> ""
        X = X + 1
    Loop
    Y = Y + 1
Loop

Range(Cells(1, 1), Cells(X - 1, Y - 1)).Copy
Windows("DLC_AWS.xlsx").Activate
Cells(2, 1).Select
ActiveSheet.Paste
ActiveWorkbook.Save
Workbooks("Run322_DLC_AWS.csv").Close
  
```

Slika 47. Dio programskog koda makronaredbe za uvoz podataka

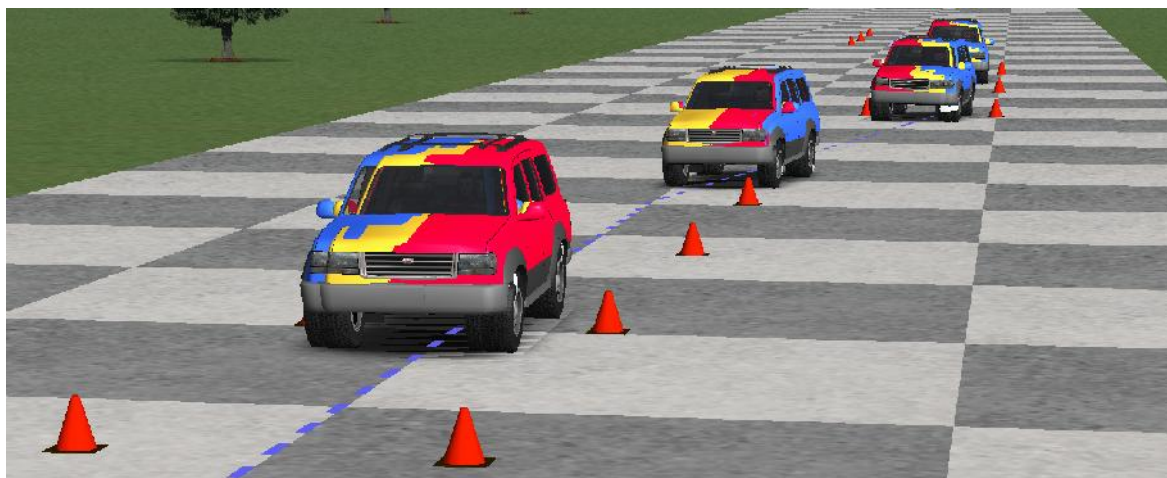
¹⁶ CSV – engl- comma seperated value

¹⁷ VBA – engl. Visual Basic for Applications; programski jezik za aplikacije Word i Excel iz programskog paketa Microsoft Office

7. REZULTATI SIMULACIJA

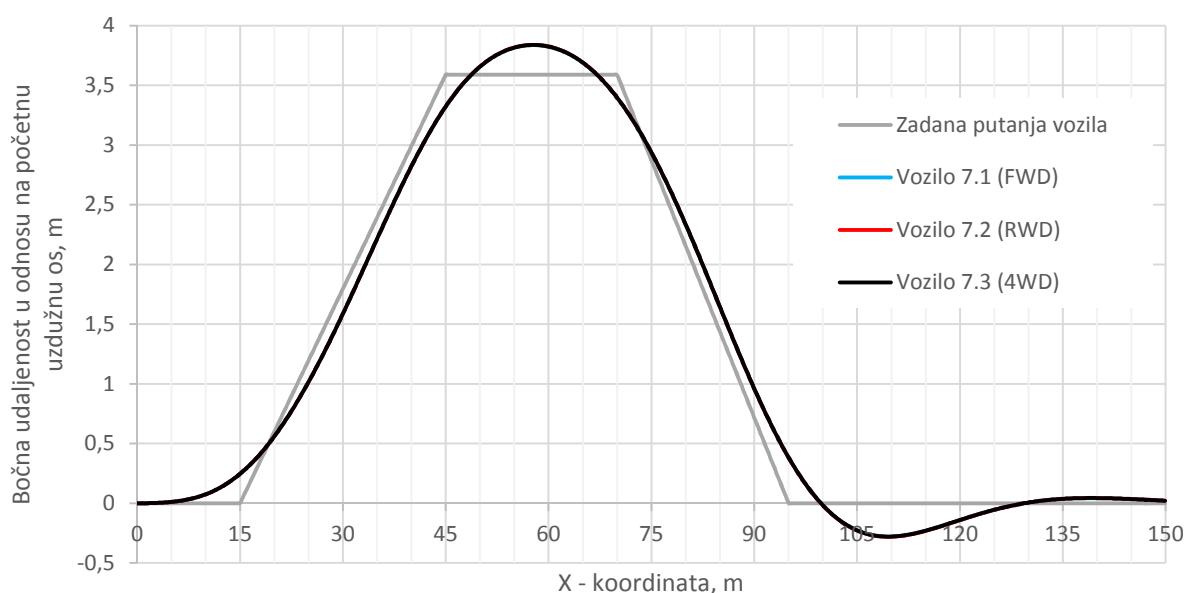
7.1. Simulacija procedure ISO 3888-1:1999 Dvostruka izmjena pravca

7.1.1. Provedba simulacije procedure ISO 3888-1:1999



Slika 48. Simulacija ispitne procedure ISO 3888-1:1999

Simulacija ispitne procedure dvostruke izmjene pravca provedena je sukladno normi. Vozilo se kreće 80 km/h pri ulasku u ispitnu stazu. Sva vozila su uspješno završila ispitivanje. Takav ishod je otkriven s obzirom da se radi o uobičajenoj situaciji iz vožnje u kojoj svako vozilo mora zadovoljiti. Za simulacije ispitne procedure kod većih brzina vozila za pretpostaviti je da bi ishod bio drugačiji. Promjena međuosovinskog razmaka (vidi poglavlje 4.1.1) za sva vozila bila je u dozvoljenim granicama prema literaturi [1], tj. iznosila je maksimalnih 2 do 3 mm. Iznimka su vozila s opterećenom masom tereta/putnika gdje je promjena iznosila maksimalnih 9 mm (za vozilo s teretom u prtljažniku i na krovu automobila). Vrsta pogona nema značajan utjecaj na provedbu ove ispitne procedure pri zadanim uvjetima. Odstupanja svih promatranih karakteristika među vozilima su zanemarivo mala pa se stoga utjecaj vrste pogona na upravljivost u sklopu ove procedure ne može više razmatrati (vidi dijagram putanje vozila (slika 49.) i tablicu 15.).



Slika 49. Utjecaj promjene vrste pogona vozila na putanju vozila kroz ispitnu stazu

7.1.2. Odstupanje vozila od zadane putanje

U tablici 15. dana su odstupanja položaja vozila od zadane putanje. Vrijednosti su dobivene na temelju poznate bo ne udaljenosti vozila (od po etne uzdužne osi ispitne staze) i bo ne udaljenosti vozila po zadanoj krivulji kojom bi se vozilo trebalo kretati. Te dvije vrijednosti su oduzete kako bi se dobila odstupanja vozila od zadane putanje na uzdužnoj udaljenosti 60 m i 115 m od po etne to ke ispitne staze, te potom izra unala odstupanja u odnosu na izvorno vozilo. To ke 60 m i 115 m izabrane zato što su to najkriti nija mjesta gdje su najve a odstupanja od zadane putanje. Na tim to kama je najve a je vjerojatnost da e vozilo pomaknuti ili srušiti unj na ispitnoj stazi.

Tablica 15. Odstupanje vozila od zadana putanje

Parametar/ Vozilo	Odstupanje od zadane putanje (mm)			
		60 m		115 m
1.1 (+2°)	235		-232	
1.2 (0°)	230	-2,35 %	-227	-2,53 %
1.3 (-2°)	224	-4,87 %	-221	-5,19 %
2.1 (9,5°)	235		-232	
2.2 (5°)	199	-18,00 %	-195	-19,37 %
2.3 (0°)	159	-48,15 %	-154	-51,14 %
2.4 (15°)	277	15,22 %	-279	16,67 %
3.1 (2600 mm)	235		-232	
3.2 (2210 mm)	293	19,88 %	-280	17,05 %
3.3 (2405 mm)	261	9,99 %	-254	8,39 %
3.4 (2795 mm)	213	-10,19 %	-215	-8,24 %
3.5 (2990 mm)	195	-20,70 %	-200	-16,40 %
4.1 (4xP)	265		-267	
4.2 (S+B(150 kg))	268	1,10 %	-265	-0,84 %
4.3 (B(225 kg))	262	-0,93 %	-256	-4,45 %
4.4 (B(150 kg)+K(75 kg))	276	4,16 %	-273	2,25 %
4.5 (S+K(150 kg))	266	0,45 %	-271	1,39 %
5.1 (FWS)	235		-232	
5.2 (AWS(+30))	30	-696,10 %	-55	-320,90 %
5.3 (AWS(+20))	37	-543,19 %	-59	-291,12 %
5.4 (AWS(-30))	64	-266,01 %	-71	-225,01 %
5.5 (AWS(-20))	61	-285,80 %	-71	-228,57 %
6.1 (130/40)	235		-232	
6.2 (100/30)	234	-0,31 %	-233	0,15 %
6.3 (65/20)	232	-1,19 %	-232	-0,11 %
6.4 (160/50)	235	0,12 %	-232	-0,24 %
6.5 (195/60)	235	0,17 %	-231	-0,49 %
7.1 (FWD)	235		-229	
7.2 (RWD)	237	0,97 %	-231	-0,51 %
7.3 (4WD)	236	0,37 %	-230	-1,10 %

Iz tablice je vidljivo da smanjenje bo nog nagiba kota a i uzdužnog nagiba osi zakretanja kota a pozitivno utje e na kretanje vozila ispitnom stazom, dok kod tre e skupine vozila pove anje me uosovinskog razmaka ima bolje rezultate. Za vozilo 4.3 s teretom u prtljažniku najmanja su odstupanja, a što se može objasniti pomakom težišta prema sredini vozila dodavanjem mase u stražnji dio vozila što povoljno utje e na ponašanje vozila. Sva vozila s upravljanjem svim kota ima imaju zna ajno manja odstupanja od vozila 5.1 s upravljanjem prednjim kota ima, a pri tome vozila 5.2 i 5.3 imaju manja odstupanja od vozila 5.4 i 5.5 iji stražnji kota i se zakre u u suprotnu stranu. Odstupanja vozila 6. i 7. su zanemariva, tj. parametri krutost opruga i vrsta pogona nemaju utjecaj na putanju vozila kroz ispitni poligon.

7.1.3. Promatrane karakteristike

Osim putanje vozila, odstupanja od zadane putanje i promjene duljine me uosovinskog razmaka promatrane su i zabilježene sljede e karakteristike:

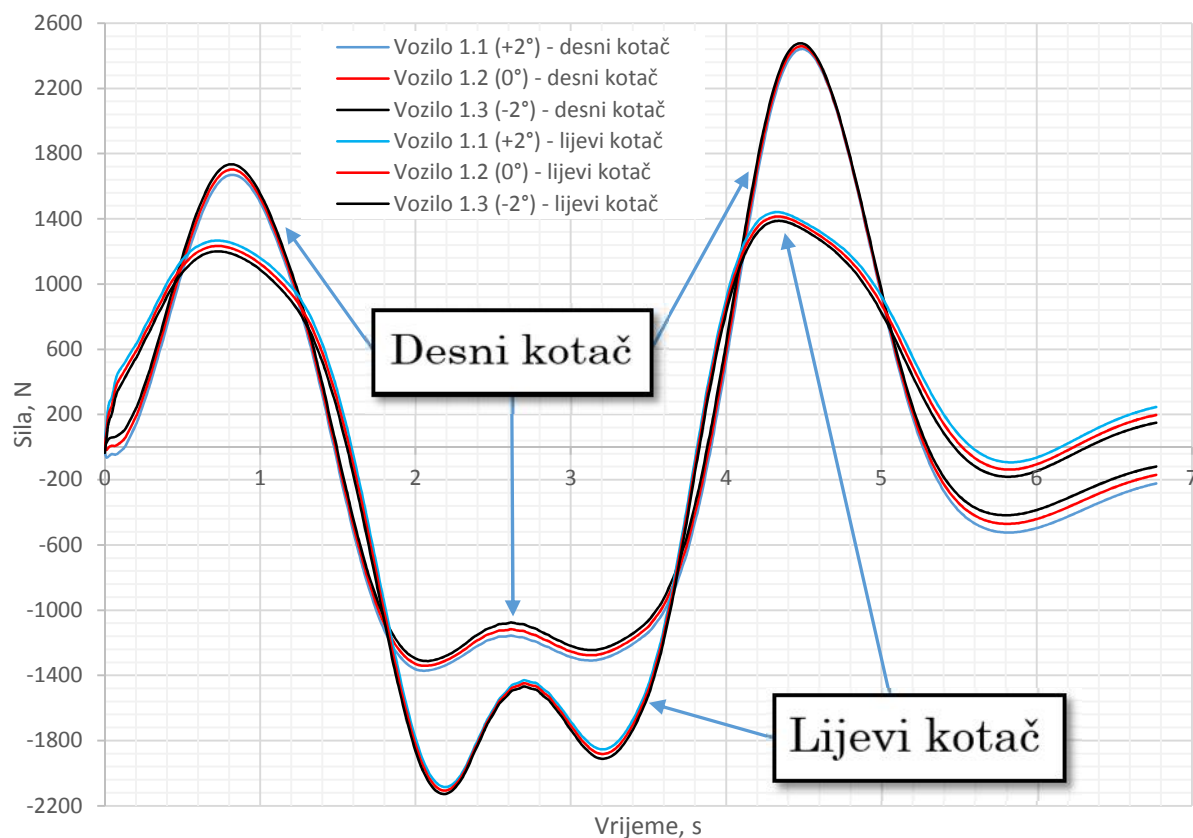
- uzdužna brzina vozila, v_x ,
- ubrzanje vozila u popre nom smjeru, a_y ,
- kut zakreta upravlja a i moment na upravlja u, δ_H i M_H ,
- kut zakreta prednjih i stražnjih kota a, δ_f i δ_r ,
- sile kota a u smjeru osi y i z, F_y , F_z ,
- bo ni kut klizanja kota a, α_f i α_r ,
- kut bo nog klizanja vozila, β ,
- zakret vozila oko uzdužne osi, φ ,
- kutna brzina oko vertikalne osi, $\dot{\psi}$
- moment na vozilo oko vertikalne osi, M_z i
- stla ivanje opruga.

7.1.3.1. Bo ni nagib kota a – ISO 3888-1:1999

Na dijagramu na slici 50. prikazana je promjena bo ne sile na kota ima za vozila na kojima je promijenjen parametar bo ni nagib kota a, a u tablici 16. prikazane su i broj ane vrijednosti sila za odre eno vrijeme simulacije. Vidljivo je da kota i vozila s manjim nagibom, tj. negativnim, mogu prenijeti ve e bo ne sile, a što je i u skladu s prou avanom literaturom u poglavlju 4.3.1. Smanjenje bo nog nagiba kota a utjecalo je i na smanjenje kuta zakreta oko vertikalne osi i podupravljanja. Na ostale karakteristike ovaj parametar nije imao zna ajan utjecaj.

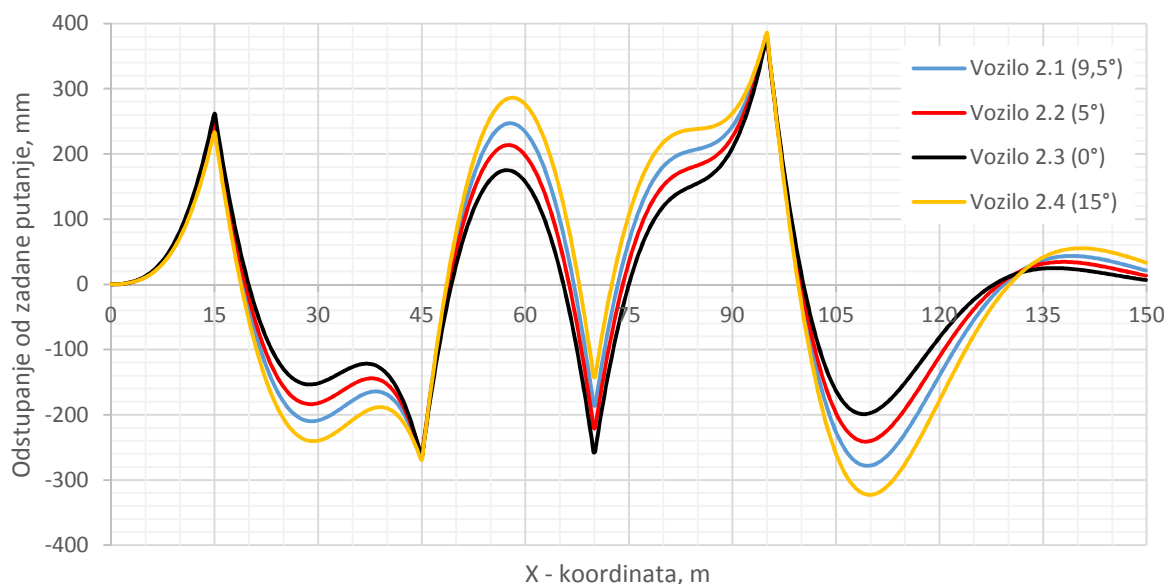
Tablica 16. Utjecaj promjene bo nog nagiba kota a na bo ne sile na kota u

Vrijeme, s	Bočna sila, N									
	0,5		1		1,5		4,5		5	
Vozilo	Desni	Lijevi	Desni	Lijevi	Desni	Lijevi	Desni	Lijevi	Desni	Lijevi
1.1	1079	1149	1502	1160	-105	335	2441	1380	928	925
1.2	1125	1110	1529	1125	-68	276	2456	1358	947	875
1.3	1170	1072	1556	1089	-30	218	2473	1334	967	825



Slika 50. Utjecaj promjene bo nog nagiba kota a na bo ne sile na kota u

7.1.3.2. Uzdužni nagib osi zakretanja kota a – ISO 3888-1:1999

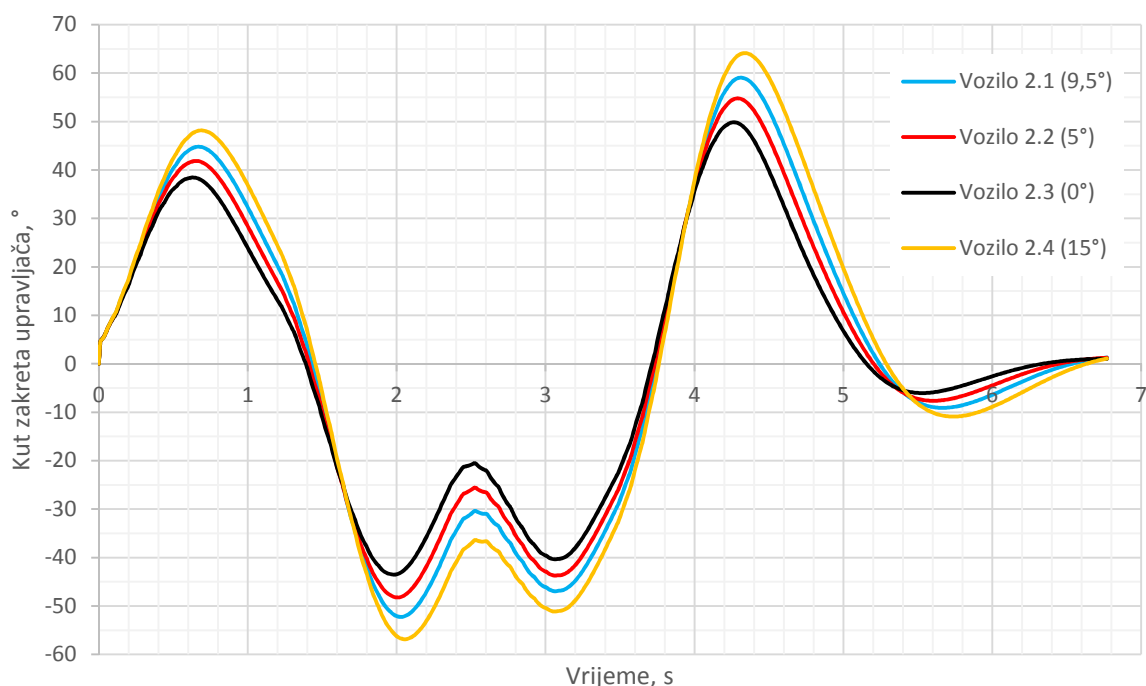


Slika 51. Utjecaj promjene uzdužnog nagiba osi zakretanja kota a na odstupanje vozila od zadane putanje

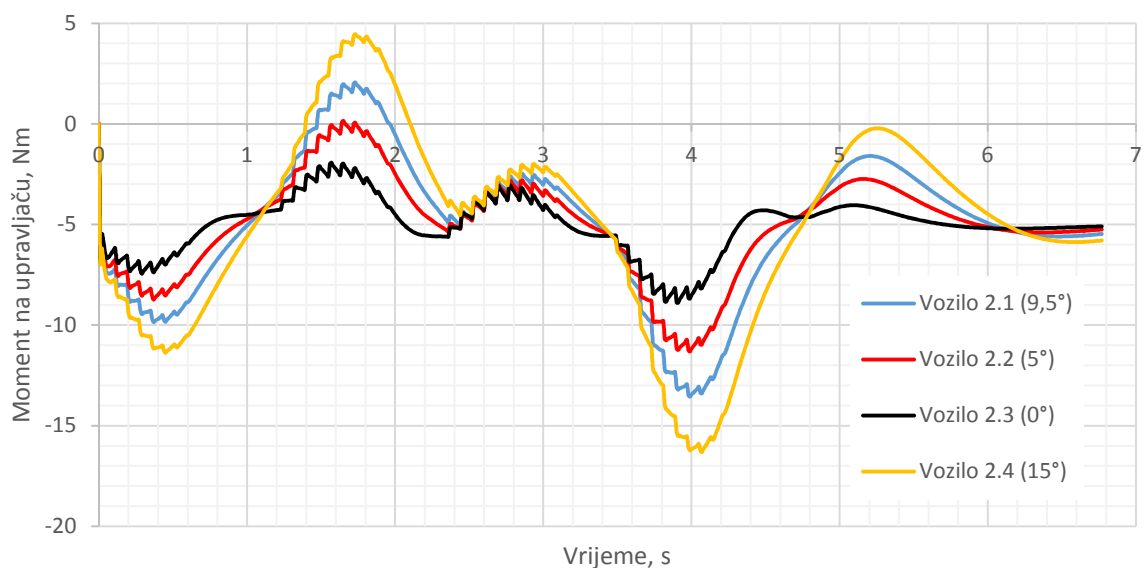
Na dijagramu na slici 51. vidi se potvrda onog što je prikazano u tablici 15., da vozilo s najmanjim uzdužnim nagibom osi zakretanja kota a ima manja odstupanja od zadane putanje

u pojedinim dijelovima ispitne staze. Ovaj dijagram je dobiven na isti način kao i vrijednosti u tablici 15., osim što je ovdje prikazano odstupanje vozila duž cijele duljine ispitne staze. Oštri vrhovi na 15, 45, 70 i 95 m javljaju se zbog oštrog prijelaza zadane putanje u tim točkama (vidi dijagram zadane putanje na slici 49.).

Slike 52. i 53. prikazuju utjecaj uzdužnog nagiba na kut zakreta na upravljaču te moment na upravljaču. Prema proučavanju literaturi u poglavlju 4.3.2 promjena uzdužnog nagiba utječe na veličinu povratnih sila, odnosno momenta na upravljaču vozila. Iz dijagrama je uočljivo da je došlo do smanjenja momenta na upravljaču smanjenjem uzdužnog nagiba osi, a ujedno je i isto vozilo imalo najmanja odstupanja od zadane putanje. Povećanjem nagiba, dobio se suprotan efekt, povećanje momenta. Posljedica toga je i veći kut zakreta upravljača što se jasno vidi na slici 52. Na ostale karakteristike ovaj parametar nije značajno ili nije utjecao.



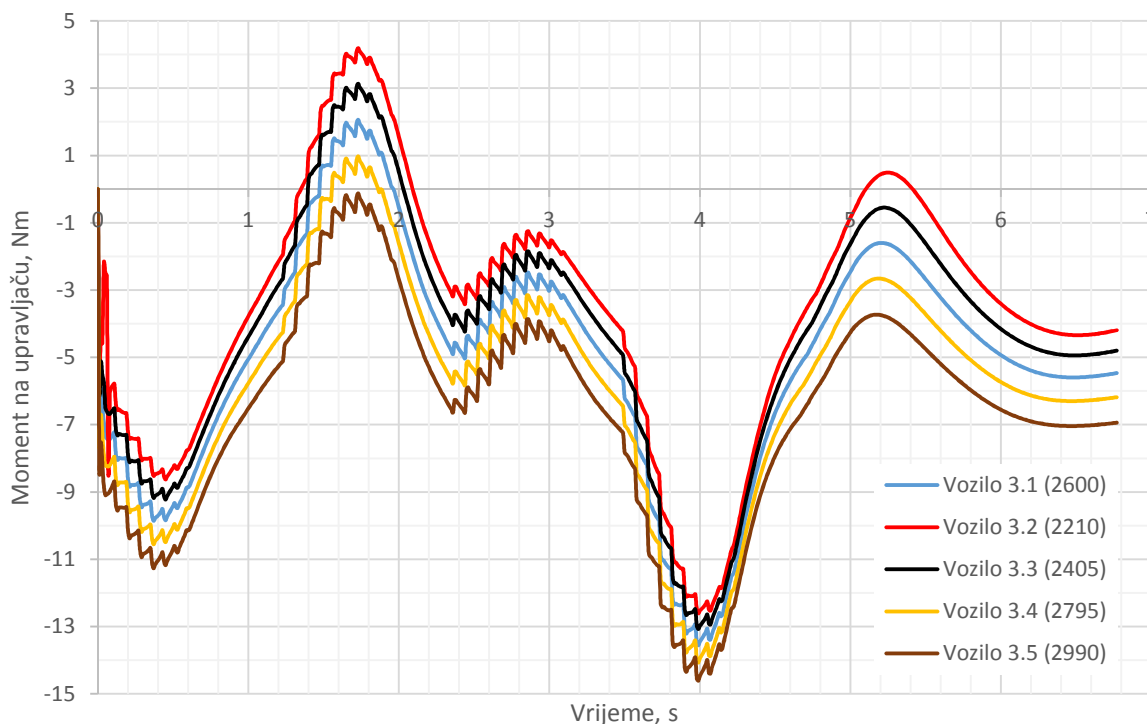
Slika 52. Utjecaj promjene uzdužnog nagiba osi zakretanja kotača na kut zakreta upravljača



Slika 53. Utjecaj promjene uzdužnog nagiba osi zakretanja kotača na moment na upravljaču

7.1.3.3. Me uosovinski razmak – ISO 3888-1:1999

Pove anje me uosovinskog razmaka pozitivno se odrazilo na ovu ispitnu proceduru. Osim što su odstupanja od zadane putanje manja, manje su i kutna brzina oko vertikalne osi te ubrzanje vozila u popre nom smjeru što je dokaz da pove anje me uosovinskog razmaka pridonosi ve oj stabilnosti po pravcu. Tome ide u prilog i smanjenje zakreta vozila oko uzdužne osi (engl. *Roll*). Moment na upravlja u (vidi dijagram na slici 54.) je porastao s pove anjem me uosovinskog razmaka, što je i u skladu s prou avanom literaturom gdje se navodi da vozila s kra im osovinskim razmakom imaju bolju okretljivost (poglavlje 4.1.1).



Slika 54. Utjecaj me uosovinskog razmaka na moment na upravlja u

Me u ostalim karakteristikama koje su prou avane u ovoj ispitnoj proceduri je i kut bo nog klizanja prednjih kota a, α_f , te kut bo nog klizanja stražnjih kota a, α_r . Te karakteristike nisu ovdje direktno razmatrane, ve se pomo u njih dobivene veli ine pomo u kojih je donesena ocjena o podupravljlivosti ili preupravljlivosti vozila. Izra unat je prosje ni bo ni kut klizanja prednjih kota a i zadnjih kota a :

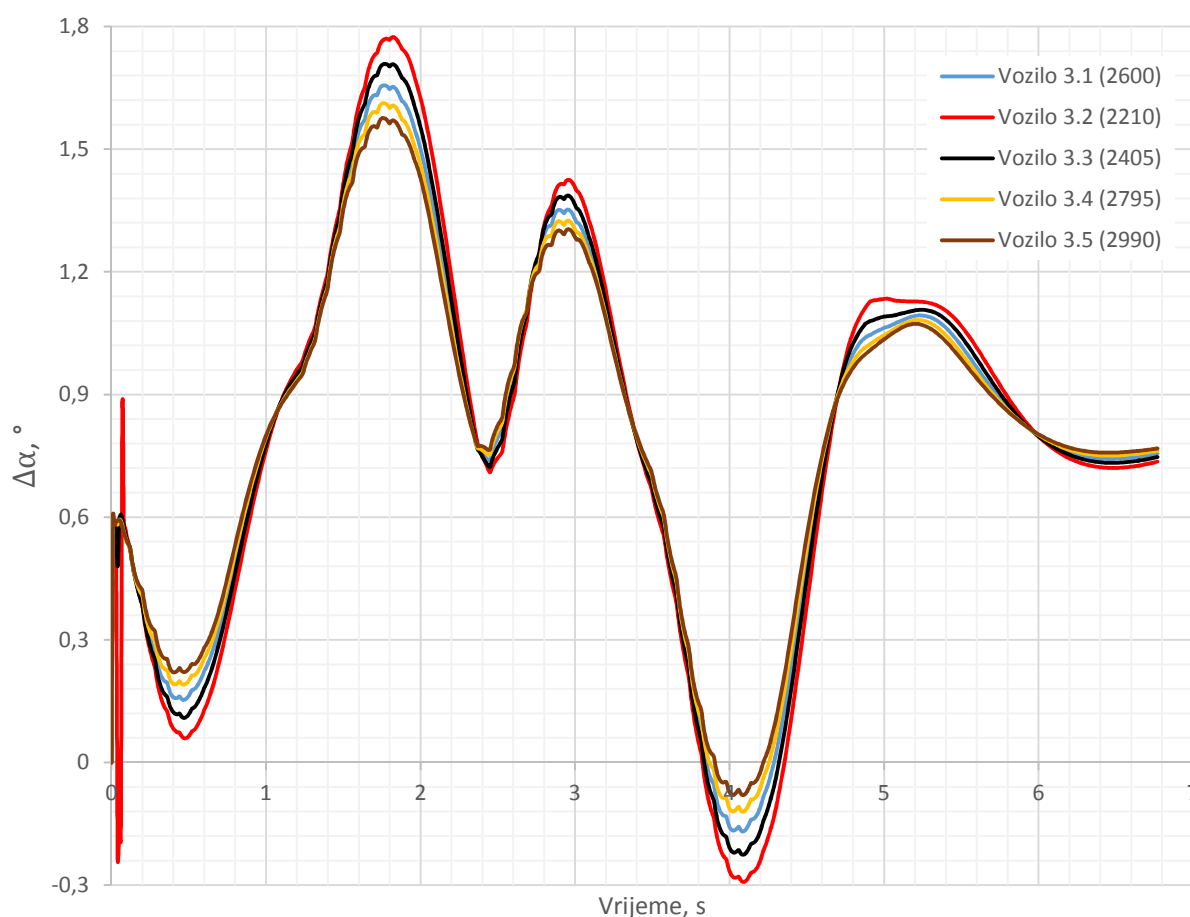
$$\alpha_f = \frac{\alpha_{f-R} + \alpha_{f-L}}{2}$$

$$\alpha_r = \frac{\alpha_{r-R} + \alpha_{r-L}}{2}$$

Potom je prema definiciji podupravljanja i preupravljanja iz literature [1] izra unata razlika tih kuteva:

$$\Delta\alpha = \alpha_f - \alpha_r$$

Ta je razlika prikazana na dijagramu na slici 55. Prema [1] ukoliko je razlika veća od nule vozilo je podupravljivo, a ukoliko je razlika negativna vozilo je preupravljivo. Razlika jednaka nuli značilo bi idealno upravljanje, bez podupravljanja ili preupravljanja. Na dijagramu je vidljivo da se vozila ponašaju kao podupravljivo vozilo. Općenito se može zaključiti je povećanje međuosovinskog razmaka utjecalo na smanjenje podupravljivosti. Pravi zaključak o utjecaju ovog parametra na podupravljivost moguće je donijeti samo provođenjem ispitne procedure ISO 4138:2012 [17]. Na ostale karakteristike ovaj parametar nije značajno utjecao.

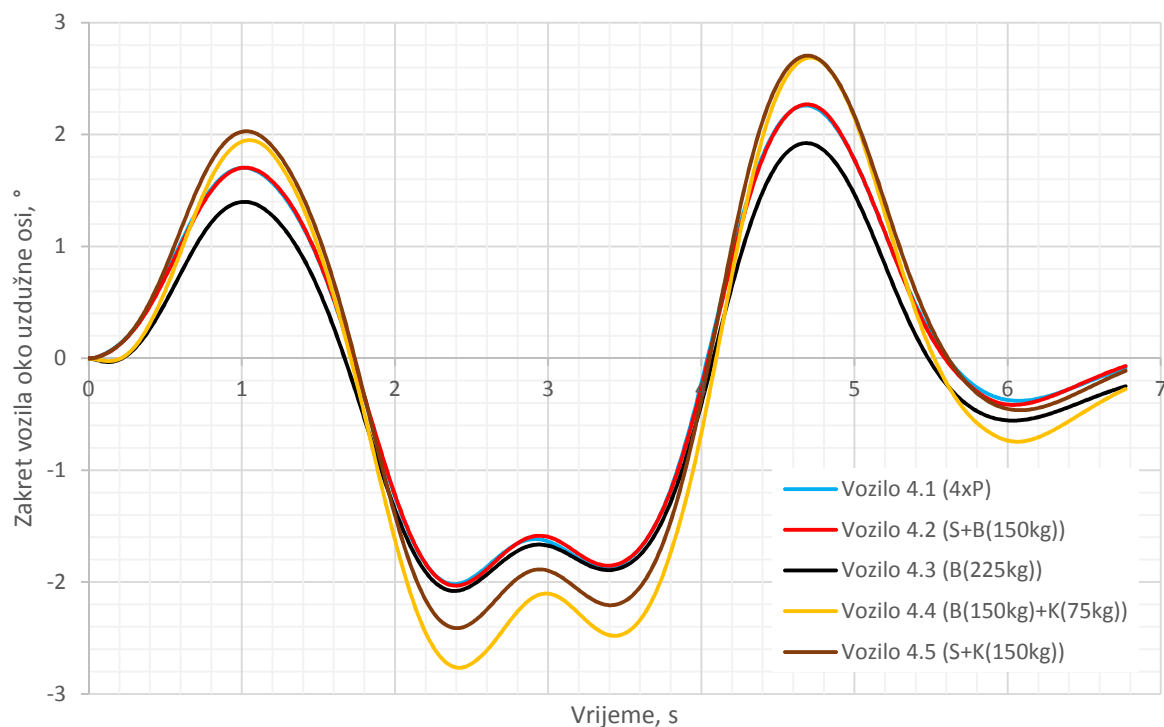


Slika 55. Utjecaj međuosovinskog razmaka na podupravljivost / preupravljivost vozila

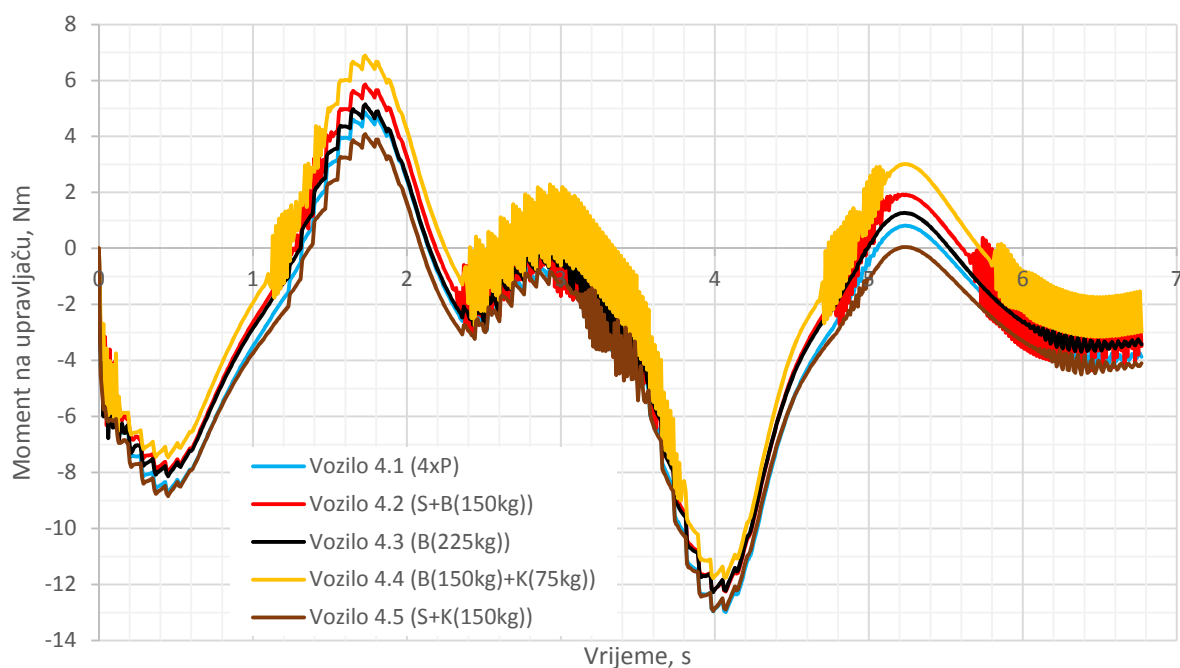
7.1.3.4. Razmještaj tereta/putnika u vozilu – ISO 3888-1:1999

Iz podataka u tablici 15. vidljivo je su za ovaj parametar postotne razlike u manje nego drugdje. Očekivano najveći je utjecaj na kut zakreta vozila oko uzdužne osi zbog većih inercijskih sila. Vozila 4.4 (teret na krovu i u prtljažniku) i 4.5 (suvozač + teret na krovu) u simulaciji postižu najveće kutove zakreta oko uzdužne osi. Razlog tome je dodavanje mase na krov vozila čime se ustvari povisilo težište vozila.

Vozilo 4.3 (teret u prtljažniku) postiže najmanji kut zakreta, a istodobno je isto vozilo postiglo najmanja odstupanja od zadane putanje iako su razlike između vozila male. Vozila 4.1 i 4.2 postižu srednje vrijednosti kutova zakreta (vidi dijagram na slici 56.) zbog povoljnog razmještaja tereta/putnika, no lošije od vozila 4.1 jer težište vozila je i dalje bliže prednjoj osovinu.



Slika 56. Utjecaj razmjesta tereta/putnika u vozilu kut zakreta vozila oko uzdužne osi



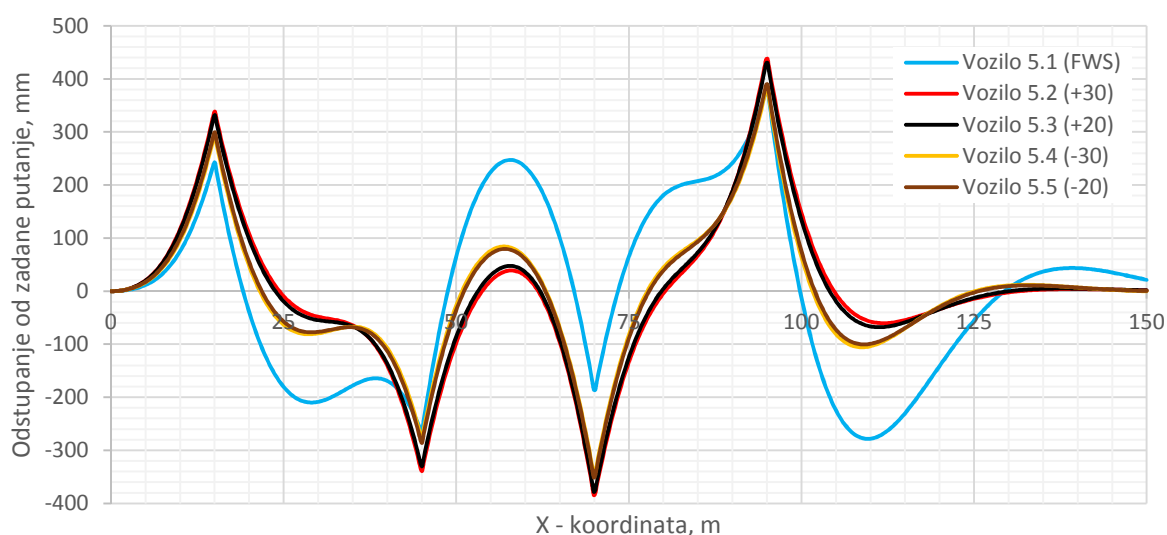
Slika 57. Utjecaj razmjesta tereta/putnika u vozilu na moment na upravljaču

Osim na kut zakreta oko uzdužne osi ovaj parametar je znatno utjecao i na oblik krivulje momenta na upravljaču. Iako sva vozila u ovoj ispitnoj proceduri imaju određene oscilacije momenta, na dijagramu na slici 57. vidljivo je da su oscilacije kod ovog parametra znatno veće. U tablici 17. su stoga prikazane vrijednosti standardne devijacije momenta na upravljaču iz čega je vidljivo da opterećena vozila imaju znatnije veće devijacije od neopterećenog vozila u simulaciji iste procedure. Tako je vozilo s najmanjim odstupanjem od zadane putanje tako je postiglo i najmanju devijaciju momenta na upravljaču, tj. može se zaključiti da su za taj slučaj oscilacije najmanje. Na ostale karakteristike ovaj parametar nije značajno utjecao.

Tablica 17. Standardna devijacija momenta na upravlja u

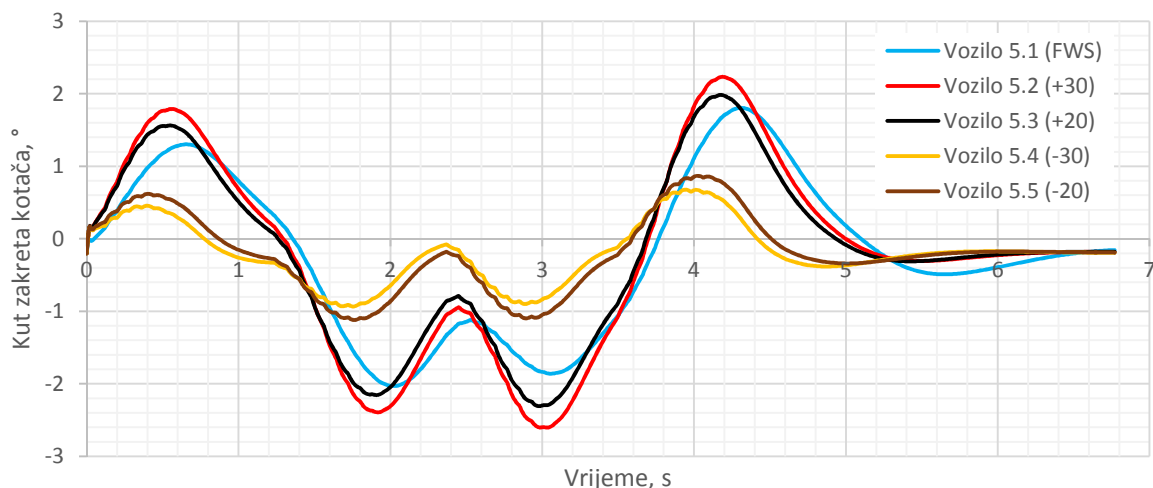
	Neopterećeno vozilo	Vozilo 4.1	Vozilo 4.2	Vozilo 4.3	Vozilo 4.4	Vozilo 4.5
Standardna devijacija momenta na upravljaču	3,439	3,998	4,101	3,881	4,256	3,776
Razlika odnosu na neopterećeno vozilo		16 %	19 %	13 %	24 %	10 %

7.1.3.5. Upravljanje prednjim/svim kota ima – ISO 3888-1:1999

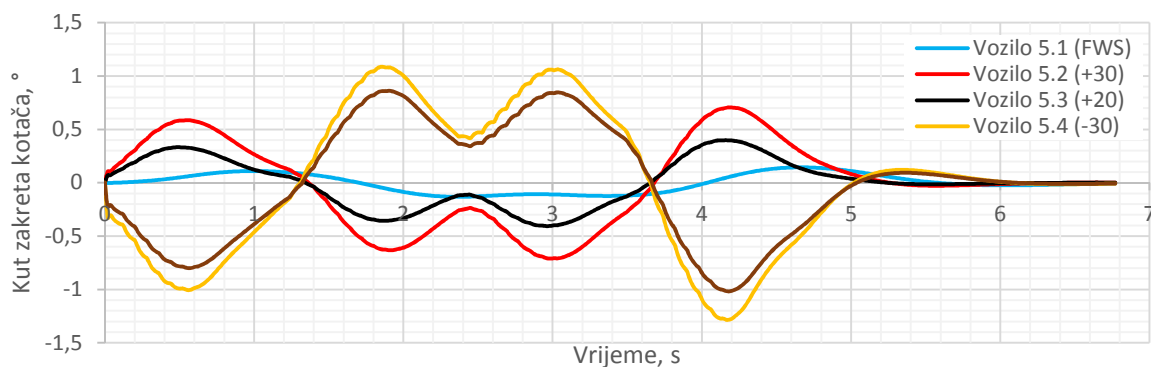


Slika 58. Utjecaj vrste upravljanja na odstupanje vozila od zadane putanje

U tablici 15. razlika u odstupanju od zadane putanje izme u upravljanja prednjim i svim kota ima je velika, a što dokazuje i dijagram na slici 58. Dok su razlike izme u samih vozila s upravljanjem svih kota a male, vozilo 5.1 poprili no odstupa od zadane putanje.

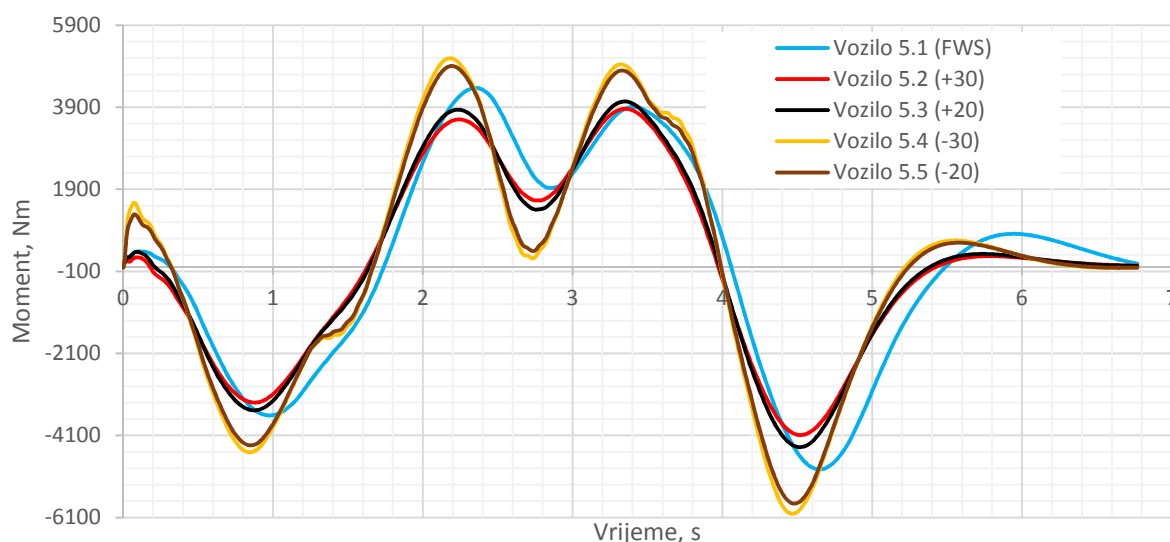


Slika 59. Kut zakreta prednjih kota a



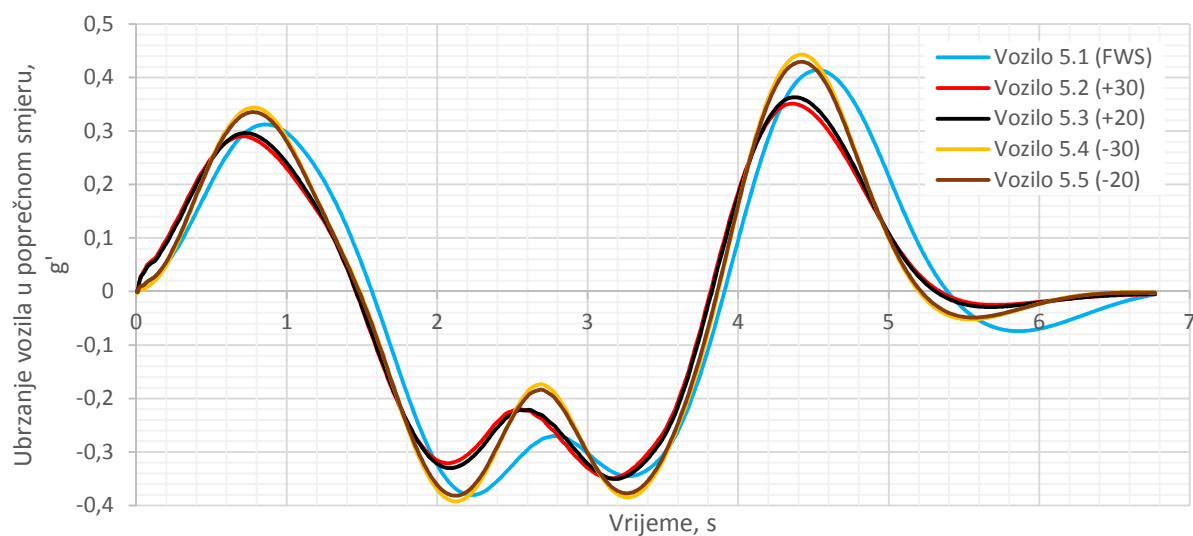
Slika 60. Kut zakreta stražnjih kota a

Na slikama 59. i 60. prikazani su dijagrami kutova zakreta prednjih odnosno stražnjih kota a. Skretanje kota a stražnjih kota a u istom smjeru kao i prednjih zahtjeva veći kut skretanja na prednjim kota a ima nego kod standardnog vozila. Vidljivo je da vozila s skretanjem stražnjih kota a u suprotnom smjeru imaju manji kut zakreta prednjih kota a, a što je potvrda da ta vozila imaju bolju okretljivost. Veći kut zakreta kota a znači i veći kut zakreta upravljača i obrnuto. Na slici 60. jasno je vidljivo suprotno zakretanje kota a na stražnjoj osovini. Vrijednosti kutova zakreta stražnjih kota a u preporučenim su granicama iz literature [1].



Slika 61. Utjecaj vrste upravljanja na moment vozila oko vertikalne osi

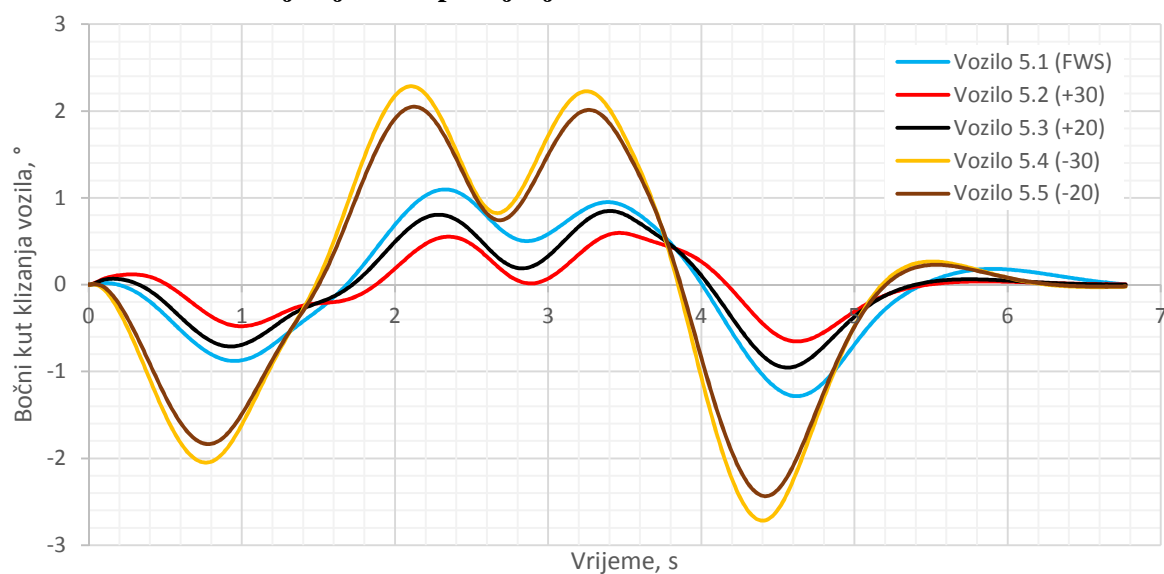
Dijagram na slici 61. prikazuje moment bočnih sila prednjih i stražnjih kota a oko vertikalne osi vozila. Kao što je opisano u poglavlju 4.4.1, taj moment je manji kod vozila s paralelnim skretanjem kota a. Razlog tome je djelovanje bočnih sila na kota a u istom smjeru (slika 36.) pa se njihovi momenti poništavaju što djeluje na povećanje dinamičke stabilnosti vozila. U dijagramu je jasno vidljivo i da je vozila 5.4 i 5.5 imaju povećani moment što je i razlog njihovoj boljoj okretljivosti. U skladu s proučavanom literaturom [1] dinamička stabilnost doprinosi (kod vozila 5.2 i 5.3) i manje ubrzanje vozila u poprečnom smjeru (brži rast, ali manje maksimalne vrijednosti, vidi dijagram na slici 62.). Osim što vozila 5.4 i 5.5 imaju veće maksimalne vrijednosti ubrzanja u poprečnom smjeru, veća je i kutna brzina oko vertikalne osi te je njezin rast strmiji [1] od krivulja drugih vozila (slika 63.). Sličan utjecaj ovaj parametar ima i na kut bočnog klizanja vozila (slika 64.). Vozila s paralelnim zakretanjem kota a postižu također znatno manji kut zakreta vozila oko uzdužne osi, a na ostale karakteristike parametar nije značajno utjecao.



Slika 62. Utjecaj vrste upravljanja na ubrzanje vozila u poprečnom smjeru



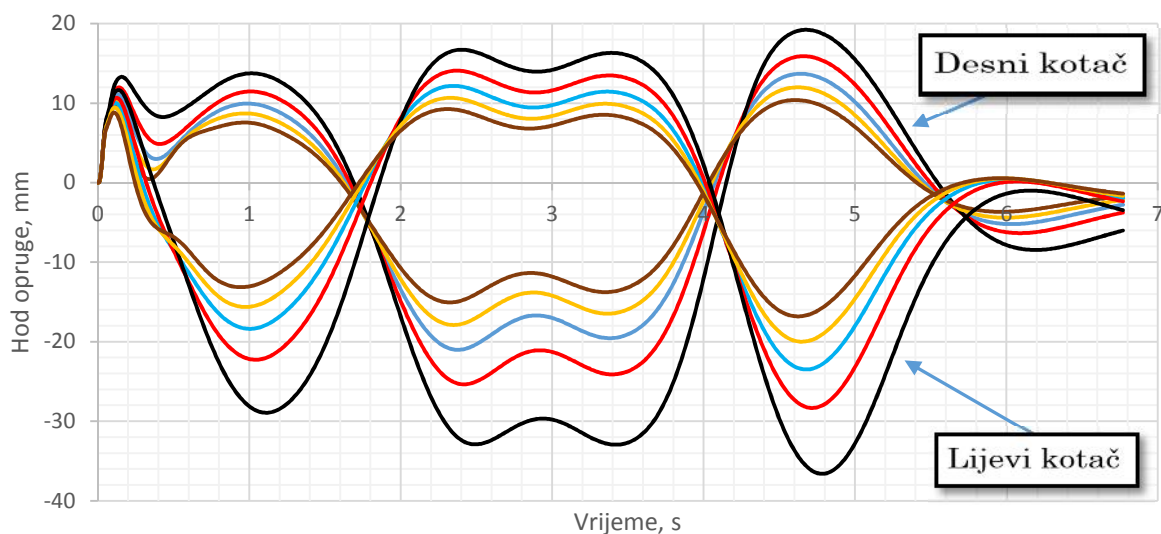
Slika 63. Utjecaj vrste upravljanja na kutnu brzinu oko vertikalne osi.



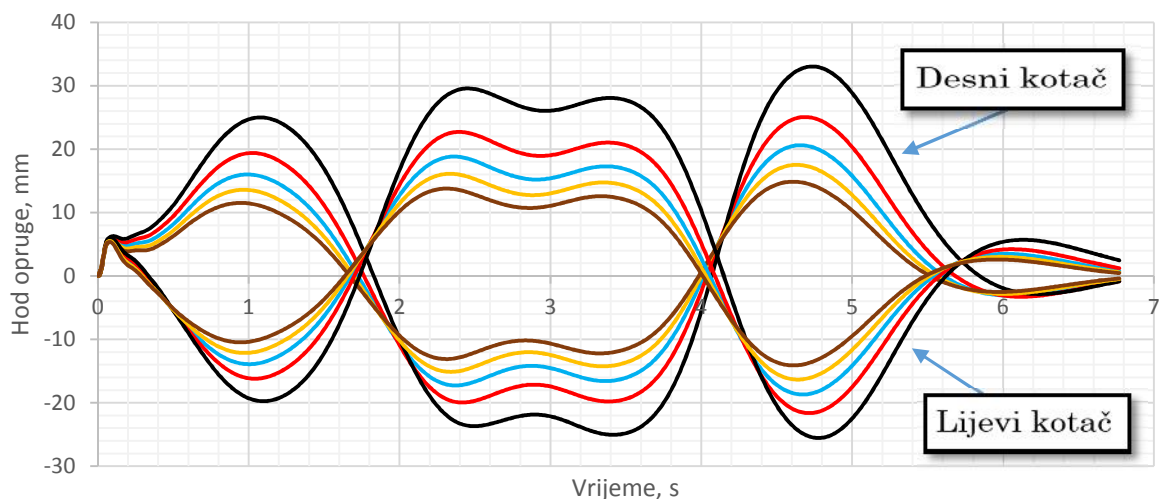
Slika 64. Utjecaj vrste upravljanja na kut bočnog klizanja vozila

7.1.3.6. Krutost opruga – ISO 3888-1:1999

Na slici 65. i 66. prikazani su dijagrami hoda opruga naprijed i straga, iz čega je vidljivo da krutost opruge na vozilima 6.4 i 6.5 rezultiraju manjim hodom opruga na pojedinom kotaču.

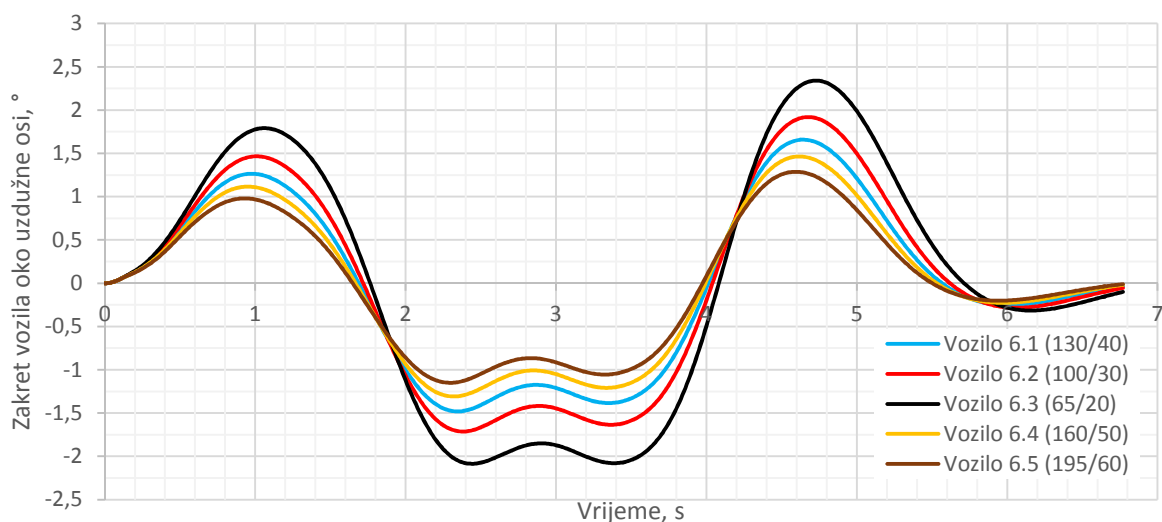


Slika 65. Utjecaj krutosti opruge na hod opruga na prednjoj osovinu

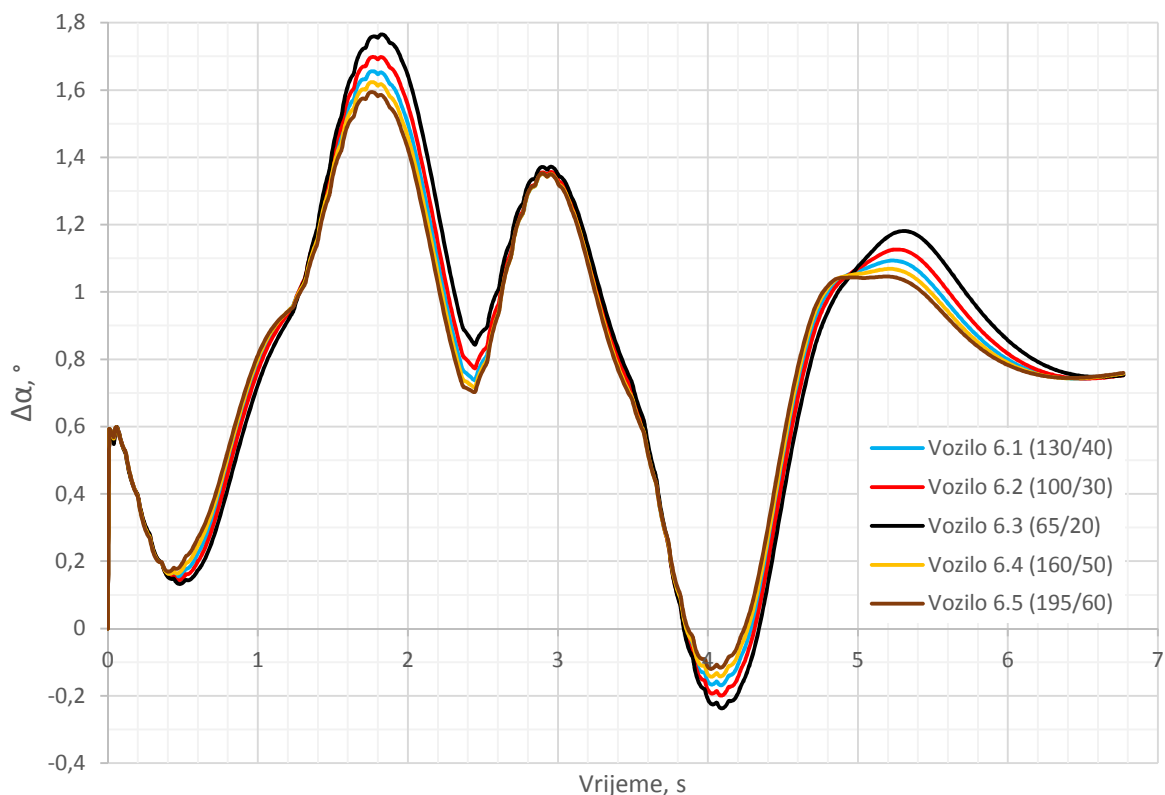


Slika 66. Utjecaj krutosti opruge na hod opruga na stražnjoj osovinu

U skladu s otkrivenjima ovaj parametar nije znatno utjecao na odstupanje vozila od zadane putanje budući da u ovoj ispitnoj proceduri više do izražaja dolazi uzdužna dinamika vozila. No unatoč tome ovaj parametar i dalje ima veliki utjecaj na karakteristiku promjene kuta zakreta vozila oko uzdužne osi (engl. *roll*, vidi dijagram na slici 67.). Vozilo 4.5 s najkrutim oprugama ima najmanji kut zakreta oko uzdužne osi, a za vozilo 4.2 s najmekšim oprugama vrijedi obrnuto. Odnos smanjenja/povećanja krutosti opruge i hoda opruge tj. kuta zakreta oko vertikalne osi kreće se gotovo proporcionalno. Osim na ove karakteristike ovaj parametar je utjecao i na svojstvo podupravljlivosti vozila. Povećanjem krutosti opruga, podupravljlivost vozila je pala kao što se može vidjeti u dijagramu na slici 68., dok za mekše opruge vrijedi obrnuto. Također treba naglasiti da se pravi zaključak o utjecaju ovog parametra na podupravljlivost može donijeti samo provođenjem ispitne procedure ISO 4138:2012 [17]. Na ostale karakteristike parametar krutost opruga nije značajno utjecao.



Slika 67. Utjecaj krutosti opruga na kut zakreta oko uzdužne osi



Slika 68. Utjecaj krutosti opruga na podupravljivost/preupravljivost

7.1.4. Zaključak dvostruke izmjene pravca

Ponašanje vozila u simulacijama ove ispitne procedure otkriveno je i sukladno proučavanoj literaturi. Povećanje vrijednosti parametara, odnosno uvođenjem razmaka i krutosti opruga odnosno smanjenje vrijednosti bojnog nagiba kota i uzdužnog nagiba osi zakretanja kota, doprinijelo je poboljšanju upravljivosti. Utjecaj vrste pogona na rezultate u ovoj simulaciji je zanemariv, a skretanje stražnjih kota u istu stranu kao i prednjih značajno je poboljšalo karakteristike vozila. Vozilo s teretom u prtljažniku najbolji je razmještaj dodatne mase u vozilu.

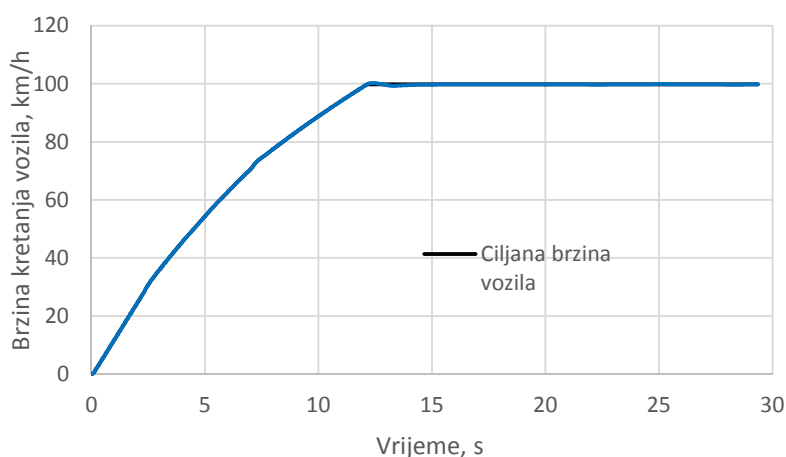
7.2. Simulacija procedure ISO 7401:2011 Ispitivanje bo nog prijelaznog odziva

7.2.1. Provedba simulacije procedure ISO 7401:2011

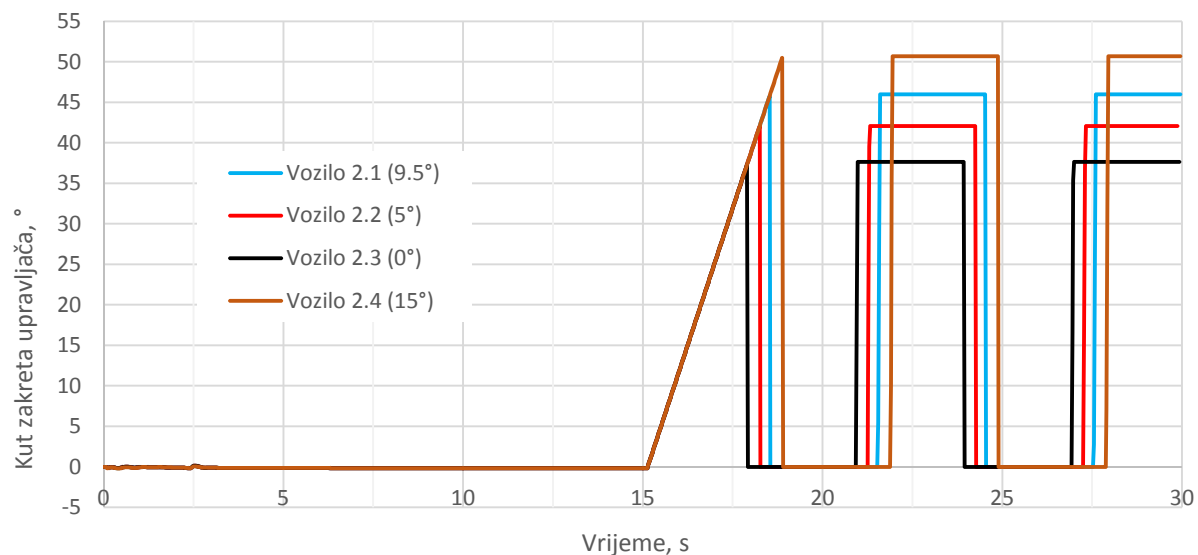


Slika 69. Simulacija ispitne procedure ISO 7401:2011

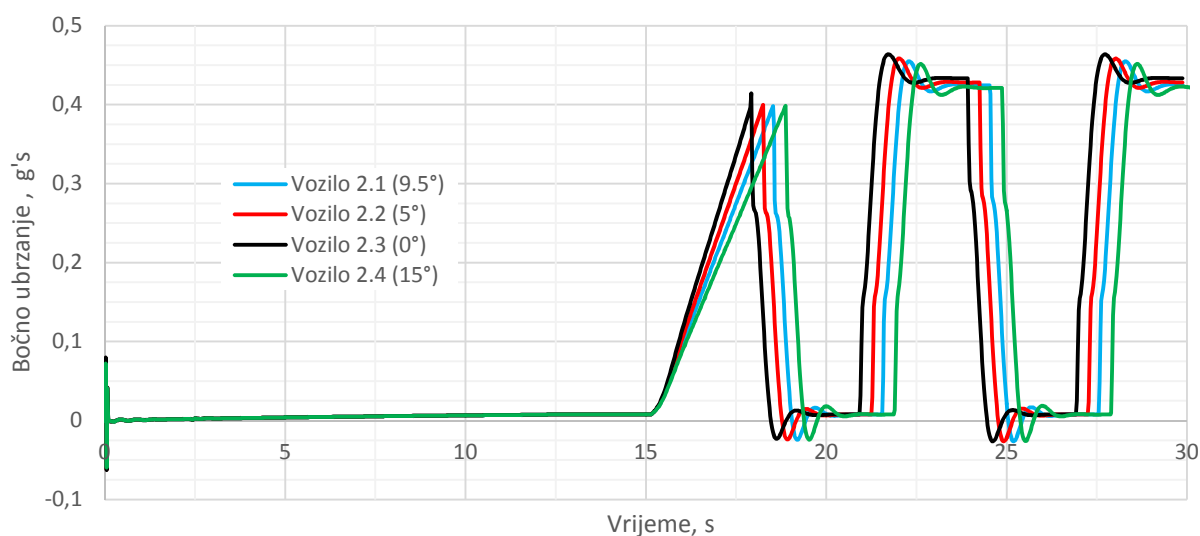
Simulacija ispitne procedure ispitivanje bo nog prijelaznog odziva provedena je sukladno normi. Vozilo ubrzava do 100 km/h, te potom slijedi pobuda upravlja a. U ovoj simulaciji provedena je pobuda volana samo iz vremenske domene. Odabrana je kora na pobuda volana. Iznos zakreta volana se razlikuje od vozila do vozila, jer je razli ita vrijednost kuta zakreta za koju se postiže ubrzanje vozila u popre nom smjeru od 4 m/s^2 za pojedino vozilo (slika 72.) Položaj pedale gasa se ne mijenja tijekom ispitne procedure, a održana je i konstantna brzina vozila (slika 70.). Procedura je provedena samo za skretanje vozila u jednu stranu (pod pretpostavkom da e rezultati ra unalne simulacije biti isti za skretanje vozila u drugu stranu). Norma propisuje da je potrebno provesti ispitivanje za vozilo sa minimalnim i maksimalnim optere enjem prema normi ISO 15037-1:2006 [13]. Kako je jedan od parametara i razmještaj tereta/putnika, ovdje su provedene simulacije s praznim vozilima (pod pretpostavkom da optere enje vozila ne e utjecati na usporedbu utjecaja pojedinih vrijednosti parametara vozila na promatrane karakteristike). Na slikama 71., 72., i 73. dani su primjer pobude na upravlja u, ubrzanja vozila u popre nom smjeru odnosno kutne brzine vozila oko vertikalne osi i to za vozila s razli itim uzdužnim nagibom osi zakretanja vozila. Za ostala vozila ne e se prikazati dijagrami karakteristika, nego su rezultati o itani sukladno normi (slika 13.) i prikazani tabli no.



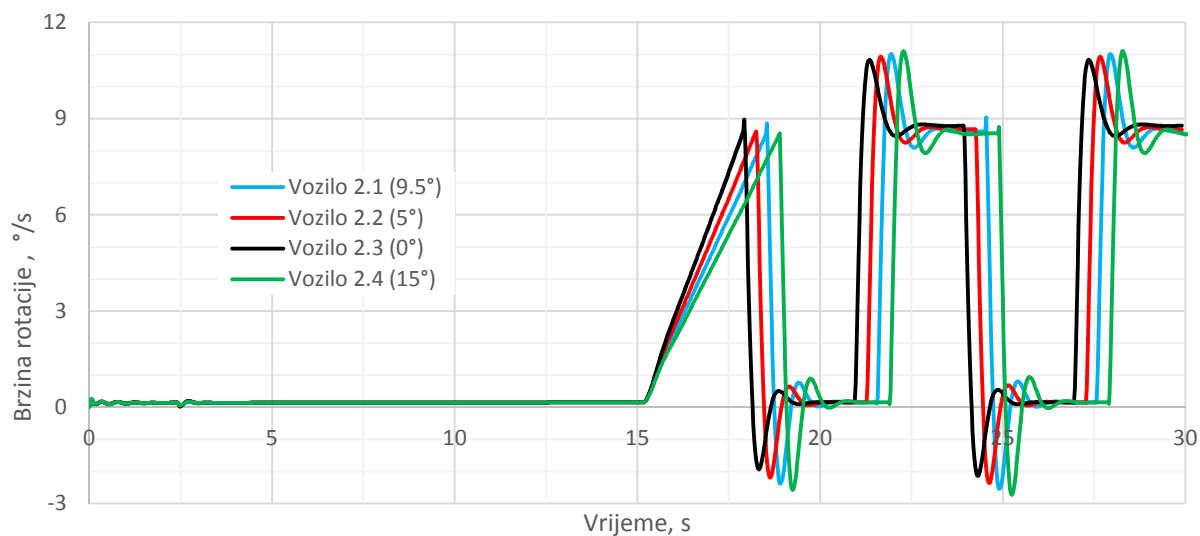
Slika 70. Brzina kretanja vozila tijekom provedbe simulacije procedure ISO 7401:2011



Slika 71. Kora na pobuda na upravlja u (uzdužni nagib osi zakretanja vozila)



Slika 72. Utjecaj promjene uzdužnog nagiba kota α na ubrzanje vozila u poprečnom smjeru kod kora ne pobude upravlja α



Slika 73. Utjecaj promjene uzdužnog nagiba kota α na kutnu brzinu vozila oko vertikalne osi kod kora ne pobude upravlja α

7.2.2. Rezultati simulacije – ISO 7401:2011

Iz dijagrama poput onih na slici 71., 72. i 73. prema normi ISO 7401:2011 [18] (vidi poglavlje 2.4) očitane su tj. izraunate preporučene karakteristike ubrzanja vozila u poprečnom smjeru i kutne brzine oko vertikalne osi:

- referentno vrijeme (za 50 % pobude upravljača) t_0 ,
- vrijeme odziva T_9 ,
- vršno vrijeme odziva T_m ,
- prebačaj U .

Za poboljšanje upravljivosti vrijeme odziva kao i prebačaj trebaju biti što manji. Prema [1] vršno vrijeme odziva kutne brzine oko vertikalne osi se uobičajeno kreće od 200 do 400 ms.

7.2.2.1. Bona nagib kota α – ISO 7401:2011

Tablica 18. Pomoćne vrijednosti - bona nagib kota α

		Vozilo 1.1 (+2°)	Vozilo 1.2 (0°)	Vozilo 1.3 (-2°)
Max. kut zakreta upravljača	°	45,995	45,360	44,712
50 % max. kuta zakreta	°	22,997	22,680	22,356
Vrijeme na 50 % kuta zakreta upr.	s	21,569	21,525	21,478
Max. ubrzanje	g'	0,455	0,455	0,456
Vrijeme za max. ubrzanje	s	22,290	22,250	22,207
Max. kutna brzina	°/s	11,020	11,011	11,005
Vrijeme za max. kutnu brzinu	s	21,945	21,902	21,856
US ¹⁸ : ubrzanje	g'	0,424	0,425	0,426
US: kutna brzina	°/s	8,584	8,600	8,618
Vrijeme na 90 % ubrzanja	s	21,985	21,944	21,899
Vrijeme na 90 % kutne brzine	s	21,733	21,690	21,644

U tablici 18. dane su pomoćne vrijednosti koje je bilo potrebno očitati s dijagrama kako bi dobili konačne vrijednosti karakteristika koje promatramo, a važna je i zbog toga jer predodređava kretanje zakreta upravljača, ubrzanja u poprečnom smjeru i kutne brzine u nedostatku dijagrama. U tablici 19. prikazane su vrijednosti traženih karakteristika potrebnih za ocjenjivanje vozila u ovoj ispitnoj proceduri, te je izraunat postotak promjene u odnosu na izvorno vozilo. Utjecaj promjene bona nagiba na promatrane karakteristike u ovoj proceduri, pri zadanim uvjetima, je zanemariv. Može se zaključiti sljedeće:

- vršno vrijeme odziva te vrijeme odziva, za ubrzanje u poprečnom smjeru i kutnu brzinu oko vertikalne osi, u porastu je sa smanjenjem bona nagiba kota α
- prebačaj ubrzanja u poprečnom smjeru i kutne brzine oko vertikalne osi pada sa smanjenjem bona nagiba kota α

Iako je utjecaj parametra dvojak, može se zaključiti da se smanjenjem bona nagiba poboljšana upravljivost i to samo iz razloga jer je parametar više utjecao na promjenu prebačaja

¹⁸ US – ustaljeno stanje, vidi poglavlje 2.4

nego na o itana vremena (razlike u vremenima odziva na razini su statisti ke pogreške). Vrijednosti vršnih vremena odziva kutne brzine oko vertikalne osi se kre u od 200 do 400 ms, što je u skladu s literaturom [1].

Tablica 19. Utjecaj promjene bo nog nagiba kota a na promatrane karakteristike u ispitnoj proceduri ISO 7401:2011

		Vozilo 1.1 (+2°)	Vozilo 1.2 (0°)	Vozilo 1.3 (-2°)
Vršno VO ¹⁹ ubrzanja	s	0,721	0,725	0,729
			0,55 %	1,10 %
Vršno VO odziva kutne brzine	s	0,376	0,377	0,378
			0,27 %	0,53 %
VO za 90 % ubrzanja	s	0,416	0,419	0,421
			0,72 %	1,19 %
VO za 90 % kutne brzine	s	0,164	0,165	0,166
			0,61 %	1,20 %
Prebačaj - ubrzanje		7,22 %	7,13 %	7,05 %
			-1,27 %	-2,44 %
Prebačaj - kutna brzina		28,38 %	28,04 %	27,7 %
			-1,22 %	-2,45 %

7.2.2.2. Uzdužni nagib osi zakretanja kota a – ISO 7401:2011

Iako dijagrami nisu priloženi u ovom radu iz tablice 20. vidljivo je da smanjenjem uzdužnog nagiba osi zakretanja kota a pada potreban kut zakreta volana da bi se postiglo traženo ubrzanje vozila u popre nom smjeru, uz porast vrijednosti ustaljenog stanja za ubrzanje i kutnu brzinu. Više vrijednosti za kutnu brzinu u blagom su padu, dok ubrzanje u popre nom smjeru blago raste s padom uzdužnog nagiba osi zakretanja. Vrijednosti vršnih vremena odziva kutne brzine oko vertikalne osi se kre u od 200 do 400 ms, što je u skladu s literaturom [1].

Tablica 20. Pomo ne vrijednosti – uzdužni nagib osi zakretanja kota a

		Vozilo 2.1 (9,5°)	Vozilo 2.2 (5°)	Vozilo 2.3 (0°)	Vozilo 2.4 (15°)
Max. kut zakreta upravljača	°	45,995	42,066	37,638	50,666
50 % max. kuta zakreta	°	22,997	21,033	18,819	25,333
Vrijeme na 50 % kuta zakreta upr.	s	21,569	21,278	20,950	21,914
Max. ubrzanje	g'	0,455	0,459	0,464	0,451
Vrijeme za max. ubrzanje	s	22,290	22,020	21,722	22,617
Max. kutna brzina	°/s	11,020	10,933	10,834	11,112
Vrijeme za max. kutnu brzinu	s	21,945	21,663	21,350	22,280
US: ubrzanje	g'	0,424	0,428	0,433	0,421
US: kutna brzina	°/s	8,584	8,659	8,774	8,515
Vrijeme na 90 % ubrzanja	s	21,985	21,705	21,392	22,321
Vrijeme na 90 % kutne brzine	s	21,733	21,449	21,130	22,073

¹⁹ VO – vrijeme odziva

Smanjenje nagiba imalo je za posljedicu povećanje vremena odziva i vršnog vremena odziva, ali je smanjen prebačaj kutne brzine oko vertikalne osi. Za vozilo 2.3 prebačaj je smanjen čak 20,9 % u odnosu na izvorno vozilo 2.1, a smanjen je i prebačaj ubrzanja u poprečnom smjeru za 2,71 %. Povećanje nagiba osi zakretanja kota smanjilo je vremena odziva, za približno iste iznose koliko je vozilo 2.3 imalo povećanje tih vrijednosti, dok je prebačaj kutne brzine znatno manje porastao. Promjena prebačaja ubrzanja u poprečnom smjeru za vozilo 2.4 u odnosu na izvorno vozilo od 0,13 % može se smatrati zanemarivom te zaključiti da je ta karakteristika promjenom parametra nepromijenjena. Upravljaljivost je poboljšana s rastom vrijednosti ovog parametra, iako su vrijednosti prebačaja porasle.

Tablica 21. Utjecaj promjene uzdužnog nagiba osi kota na promatrane karakteristike u ispitnoj proceduri ISO 7401:2011

		Vozilo 2.1 (9,5°)	Vozilo 2.2 (5°)	Vozilo 2.3 (0°)	Vozilo 2.4 (15°)
Vršno VO ubrzanja	s	0,721	0,742	0,772	0,703
			2,83 %	6,61 %	-2,56 %
Vršno VO odziva kutne brzine	s	0,376	0,385	0,4	0,366
			2,34 %	3,75 %	-9,29 %
VO za 90 % ubrzanja	s	0,416	0,427	0,442	0,407
			2,58 %	5,88 %	-2,21 %
VO za 90 % kutne brzine	s	0,164	0,171	0,18	0,159
			4,09 %	8,89 %	-3,14 %
Prebačaj - ubrzanje		7,22 %	7,16 %	7,03 %	7,21 %
			-0,84 %	-2,71 %	-0,13 %
Prebačaj - kutna brzina		28,38 %	26,26 %	23,47 %	30,50 %
			-8,08 %	-20,90 %	6,94 %

7.2.2.3. Međuosovinski razmak – ISO 7401:2011

Tablica 22. Pomoćne vrijednosti – međuosovinski razmak

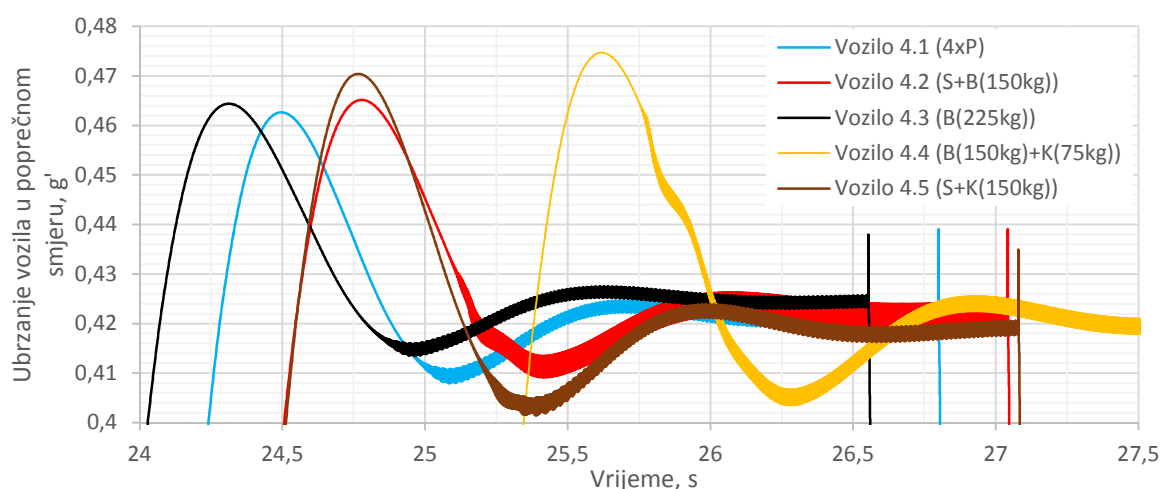
		Vozilo 3.1 (2600)	Vozilo 3.2 (2210)	Vozilo 3.3 (2405)	Vozilo 3.4 (2795)	Vozilo 3.5 (2990)
Max. kut zakreta upravljača	°	45,995	45,009	45,468	46,602	47,264
50 % max. kuta zakreta	°	22,997	22,505	22,734	23,301	23,632
Vrijeme na 50 % kuta zakreta upr.	s	21,569	21,584	21,571	21,575	21,586
Max. ubrzanje	g'	0,455	0,465	0,460	0,450	0,446
Vrijeme za max. ubrzanje	s	22,290	22,353	22,315	22,277	22,274
Max. kutna brzina	°/s	11,020	11,116	11,075	10,956	10,883
Vrijeme za max. kutnu brzinu	s	21,945	22,004	21,968	21,931	21,926
US: ubrzanje	g'	0,424	0,426	0,425	0,424	0,423
US: kutna brzina	°/s	8,584	8,607	8,595	8,573	8,561
Vrijeme na 90 % ubrzanja	s	21,985	22,028	22,000	21,980	21,982
Vrijeme na 90 % kutne brzine	s	21,733	21,770	21,745	21,730	21,735

Tablica 23. jasno ukazuje da je upravljivost poboljšana s povećanjem međuosovinskog razmaka što je u skladu s navedenim u poglavlju 4.1.1. Tako su vrijednosti vršnih vremena odziva kutne brzine se kreću od 200 do 400 ms, što je u skladu s literaturom [1]. Svi pokazatelji ponašanja vozila u ovoj ispitnoj proceduri su pali porastom međuosovinskog razmaka. Iako je potreban nešto veći kut zakreta upravljača za postizanje zadanog ubrzanja u poprečnom smjeru (tablica 22.), vršne vrijednosti ubrzanja i kutne brzine su pale porastom međuosovinskog razmaka. Porast vrijednosti ovog parametra doveo je do poboljšanja upravljivosti.

Tablica 23. Utjecaj promjene međuosovinskog razmaka na promatrane karakteristike u ispitnoj proceduri ISO 7401:2011

		Vozilo 3.1 (2600)	Vozilo 3.2 (2210)	Vozilo 3.3 (2405)	Vozilo 3.4 (2795)	Vozilo 3.5 (2990)
Vršno VO ubrzanja	s	0,721	0,769	0,744	0,702	0,688
			6,24%	3,09%	-2,71%	-4,80%
Vršno VO odziva kutne brzine	s	0,376	0,42	0,397	0,356	0,34
			10,48%	5,29%	-5,62%	-10,59%
VO za 90 % ubrzanja	s	0,416	0,444	0,429	0,405	0,396
			6,31%	3,03%	-2,72%	-5,05%
VO za 90 % kutne brzine	s	0,164	0,186	0,174	0,155	0,149
			11,83%	5,75%	-5,81%	-10,07%
Prebačaj - ubrzanje		7,22%	9,09%	8,16%	6,32%	5,46%
			20,56%	11,51%	-14,37%	-32,36%
Prebačaj - kutna brzina		28,38%	29,16%	28,85%	27,79%	27,13%
			2,66%	1,64%	-2,11%	-4,59%

7.2.2.4. Razmještaj tereta/putnika u vozilu – ISO 7401:2011



Slika 74. Oscilacije ubrzanja u poprečnom smjeru pri ustaljenom stanju

Slično kao i u proceduri ISO 3888-1:1999 (vidi poglavlje 7.1.3.4), ovaj je parametar uzrokovao oscilacije zabilježenih vrijednosti ubrzanja u poprečnom smjeru i kutne brzine oko vertikalne osi. Iako su razlike u standardnoj devijaciji znatno manje nego kod procedure

dvostruke izmjene pravca, to ipak treba uzeti u obzir pri interpretaciji rezultata. Oscilacije se ne pojavljuju tijekom postizanja vršnih vrijednosti karakteristika, ve kad vrijednosti padaju i vozilo ulazi u ustaljeno stanje (slika 74.). Kut zakreta upravlja a je porastao za optere ena vozila približno na 50° s $45,995^\circ$ za izvorno neoptere eno vozilo (vidi prvo vozilo iz tablice 18. ili 20. ili 22. te vidi tablicu 24. za optere eno vozilo). Vrijednosti kutne brzine i ubrzanja nisu se znatno promijenile u odnosu na neoptere eno vozilo.

Tablica 24. Pomo ne vrijednosti – razmještaj tereta/putnika u vozilu

		Vozilo 4.1 (4xP)	Vozilo 4.2 (S+B(150kg))	Vozilo 4.3 (B(225kg))	Vozilo 4.4 (B(150kg)+ K(75kg))	Vozilo 4.5 (S+K(150kg))
Max. kut zakreta upravljača	°	50,463	49,586	48,114	50,247	51,921
50 % max. kuta zakreta	°	25,232	24,793	24,057	25,124	25,961
Vrijeme na 50 % kuta zakreta upr.	s	23,822	24,064	23,576	24,909	24,102
Max. ubrzanje	g'	0,463	0,465	0,464	0,475	0,470
Vrijeme za max. ubrzanje	s	24,496	24,778	24,313	25,619	24,766
Max. kutna brzina	°/s	11,591	11,408	11,257	11,619	11,859
Vrijeme za max. kutnu brzinu	s	24,165	24,435	23,959	25,282	24,444
US: ubrzanje	g'	0,422	0,424	0,424	0,421	0,420
US: kutna brzina	°/s	8,500	8,572	8,593	7,613	8,416
Vrijeme na 90 % ubrzanja	s	24,207	24,475	24,010	25,312	24,478
Vrijeme na 90 % kutne brzine	s	23,967	24,225	23,701	25,051	24,245

Tablica 25. Utjecaj promjene razmještaja tereta/putnika u vozilu na promatrane karakteristike u ispitnoj proceduri ISO 7401:2011

		Vozilo 4.1 (4xP)	Vozilo 4.2 (S+B(150kg))	Vozilo 4.3 (B(225kg))	Vozilo 4.4 (B(150kg) +K(75kg))	Vozilo 4.5 (S+K(150kg))
Vršno VO ubrzanja	s	0,674	0,714	0,737	0,71	0,664
			5,60%	8,55%	5,07%	-1,51%
Vršno VO odziva kutne brzine	s	0,343	0,371	0,383	0,373	0,342
			7,55%	10,44%	8,04%	-0,29%
VO za 90 % ubrzanja	s	0,385	0,411	0,434	0,403	0,376
			6,33%	11,29%	4,47%	-2,39%
VO za 90 % kutne brzine	s	0,145	0,161	0,125	0,142	0,143
			9,94%	-16,00%	-2,11%	-1,40%
Prebačaj - ubrzanje		9,68%	9,70%	9,49%	12,76%	12,08%
			0,21%	-1,94%	24,17%	19,94%
Prebačaj - kutna brzina		36,36%	33,08%	31,00%	52,62%	40,90%
			-9,92%	-17,27%	30,91%	11,12%

Prema tablici 25. vozila 4.1 i 4.5 ostvarila su najbolje rezultate, s jednom bitnom razlikom izme u njih. Vozilo 4.5 zbog višeg težišta ima bolja vremena odziva no to rezultira ve im

preba ajem i naginganjem vozila što nisu dobra svojstva upravljivosti. Vozila 4.2 i 4.3 imaju manji preba aj zahvaljuju i pomaku težišta bliže središtu vozila. Vrijednosti vršnih vremena odziva za kutnu brzinu oko vertikalne osi se kre u od 200 do 400 ms, što je u skladu s literaturom [1]. Zaključiti je da je najbolji razmještaj mase u vozilu 3 putnika s voza em.

7.2.2.5. Upravljanje prednjih/svih kota a – ISO 7401:2011

Tablica 26. Pomo ne vrijednosti – upravljanje svih kota a

		Vozilo 5.1 (FWS)	Vozilo 5.2 (+30)	Vozilo 5.3 (+20)	Vozilo 5.4 (-30)	Vozilo 5.5 (-20)
Max. kut zakreta upravljača	°	45,995	54,176	49,316	25,677	29,228
50 % max. kuta zakreta	°	22,997	27,088	24,658	12,839	14,614
Vrijeme na 50 % kuta zakreta upr.	s	21,569	22,175	21,814	20,064	20,326
Max. ubrzanje	g'	0,455	0,437	0,443	0,503	0,487
Vrijeme za max. ubrzanje	s	22,290	23,031	22,644	20,826	21,093
Max. kutna brzina	°/s	11,020	9,888	10,250	13,074	12,443
Vrijeme za max. kutnu brzinu	s	21,945	22,657	22,269	20,449	20,714
US: ubrzanje	g'	0,424	0,418	0,422	0,465	0,453
US: kutna brzina	°/s	8,584	8,463	8,534	9,415	9,169
Vrijeme na 90 % ubrzanja	s	21,985	22,669	22,301	20,533	20,796
Vrijeme na 90 % kutne brzine	s	21,733	22,401	22,023	20,221	20,488

Vrijednosti karakteristika kre u se sli no kao i u proceduri ISO 3888-1:1999, odnosno u skladu s literaturom [1] (vidi poglavlje 4.4.1). Kada stražnji kota i skre u u istu stranu kao prednji, ubrzanje u popre nom smjeru i kutna brzina oko vertikalne osi padaju, i obrnuto u sluaju skretanja stražnjih kota a u suprotnu stranu. Suprotno literaturi, prema kojoj bi ubrzanje trebalo rasti brzo, u tablici 27. vremena odziva za ubrzanje su pove ana (vozila 5.2 i 5.3). Vozila 5.4 i 5.5 imaju nešto manje vrijeme odziva od standardnog vozila no samo za 90 % ustaljenog

Tablica 27. Utjecaj upravljanja svih kota a na promatrane karakteristike u ispitnoj proceduri ISO 7401:2011

		Vozilo 5.1 (FWS)	Vozilo 5.2 (+30)	Vozilo 5.3 (+20)	Vozilo 5.4 (-30)	Vozilo 5.5 (-20)
Vršno VO ubrzanja	s	0,721	0,856	0,83	0,762	0,767
			15,77%	13,13%	5,38%	6,00%
Vršno VO odziva kutne brzine	s	0,376	0,482	0,455	0,385	0,388
			21,99%	17,36%	2,34%	3,09%
VO za 90 % ubrzanja	s	0,416	0,494	0,487	0,469	0,47
			15,79%	14,58%	11,30%	11,49%
VO za 90 % kutne brzine	s	0,164	0,226	0,209	0,157	0,162
			27,43%	21,53%	-4,46%	-1,23%
Prebačaj - ubrzanje		7,22%	4,42%	5,08%	8,16%	7,55%
			-63,57%	-42,28%	11,49%	4,28%
Prebačaj - kutna brzina		28,38%	16,85%	20,11%	38,87%	35,71%
			-68,46%	-41,15%	26,98%	20,54%

stanja (kutna brzina ima brži rast za vozila 5.4 i 5.5, vidi poglavlje 4.4.1). Prebačaj za vozila s skretanjem stražnjih kotača u istu stranu kao i prednji otkrivano ima puno manji prebačaj ubrzanja i kutne brzine. Ovisno o tome što se želi poboljšati, stabilnost pri upravljanju ili vrijeme odziva (okretljivost) tako se ocjenjuju vozila simulirana u ovoj ispitnoj proceduri. To je dokaz zašto se zapravo u praksi koristi kombinacija upravljanja stražnjih kotača u obje strane. Vrijednosti kutova zakreta stražnjih kotača kreću se do maksimalnih $1,1^\circ$ što je u preporučenim granicama iz literature [1].

7.2.2.6. Krutost opruga – ISO 7401:2011

Tablica 28. Pomoćne vrijednosti – krutost opruga

		Vozilo 6.1 (130/40)	Vozilo 6.2 (100/30)	Vozilo 6.3 (65/20)	Vozilo 6.4 (160/50)	Vozilo 6.5 (200/80)
Max. kut zakreta upravljača	°	45,995	46,872	48,411	45,374	44,861
50 % max. kuta zakreta	°	22,997	23,436	24,206	22,687	22,430
Vrijeme na 50 % kuta zakreta upr.	s	21,569	21,638	21,762	21,519	21,479
Max. ubrzanje	g'	0,455	0,459	0,468	0,453	0,451
Vrijeme za max. ubrzanje	s	22,290	22,347	22,455	22,252	22,222
Max. kutna brzina	°/s	11,020	11,168	11,456	10,926	10,858
Vrijeme za max. kutnu brzinu	s	21,945	22,010	22,128	21,899	21,862
US: ubrzanje	g'	0,424	0,422	0,417	0,426	0,428
US: kutna brzina	°/s	8,584	8,523	8,422	8,624	8,659
Vrijeme na 90 % ubrzanja	s	21,985	22,040	22,141	21,947	21,916
Vrijeme na 90 % kutne brzine	s	21,733	21,797	21,913	21,688	21,651

Tablica 29. Utjecaj promjene krutosti opruga na promatrane karakteristike u ispitnoj proceduri ISO 7401:2011

		Vozilo 6.1 (130/40)	Vozilo 6.2 (100/30)	Vozilo 6.3 (65/20)	Vozilo 6.4 (160/50)	Vozilo 6.5 (200/80)
Vršno VO ubrzanja	s	0,721	0,709	0,693	0,733	0,743
			-1,69%	-4,04%	1,64%	2,96%
Vršno VO odziva kutne brzine	s	0,376	0,372	0,366	0,38	0,383
			-1,08%	-2,73%	1,05%	1,83%
VO za 90 % ubrzanja	s	0,416	0,402	0,379	0,428	0,437
			-3,48%	-9,76%	2,80%	4,81%
VO za 90 % kutne brzine	s	0,164	0,159	0,151	0,169	0,172
			-3,14%	-8,61%	2,96%	4,65%
Prebačaj - ubrzanje		7,22%	8,85%	12,16%	6,24%	5,52%
			18,38%	40,62%	-15,82%	-30,83%
Prebačaj - kutna brzina		28,38%	31,02%	36,03%	26,68%	25,39%
			8,52%	21,23%	-6,35%	-11,75%

Vrijednosti u tablici 29. u skladu su s o ekivanjima. Vozila s kru im oprugama postigla su lošija vremena odziva, ali znatno manji preba aj i kutne brzine oko vertikalne osi i ubrzanja u popre nom smjeru. Odziv je pao za nešto manji iznos nego je poboljšan kod vozila s mekim oprugama, te je istovremeno je preba aj tih vozila znatno lošiji. Stoga u ovoj proceduri vozila s kru im oprugama imaju nešto bolju upravljivost.

7.2.2.7. Vrsta pogona – ISO 7401:2011

Ovaj parametar nije imao zna ajniji utjecaj na promatrane karakteristike u ovoj proceduri u zadanim uvjetima simulacije. Iako je ve ina rezultata na razini statisti ke pogreške, Vozila 7.2 i 7.3 imaju bolja vremena odziva uz neznatno lošiji preba aj, s tim da vozilo 7.2 s pogonom na stražnje kota a postiže bolji odziv uz manji preba aj.

Tablica 30. Pomo ne vrijednosti – vrsta pogona

		Vozilo 7.1 (FWD)	Vozilo 7.2 (RWD)	Vozilo 7.3 (4WD)
Max. kut zakreta upravljača	°	45,995	47,979	47,804
50 % max. kuta zakreta	°	22,997	23,990	23,902
Vrijeme na 50 % kuta zakreta upr.	s	21,569	21,358	18,689
Max. ubrzanje	g'	0,455	0,457	0,457
Vrijeme za max. ubrzanje	s	22,290	22,106	19,427
Max. kutna brzina	°/s	11,020	11,082	11,122
Vrijeme za max. kutnu brzinu	s	21,945	21,737	19,067
US: ubrzanje	g'	0,424	0,426	0,425
US: kutna brzina	°/s	8,584	8,626	8,606
Vrijeme na 90 % ubrzanja	s	21,985	21,785	19,113
Vrijeme na 90 % kutne brzine	s	21,733	21,525	18,856

Tablica 31. Utjecaj vrste pogona na promatrane karakteristike u ispitnoj proceduri ISO 7401:2011

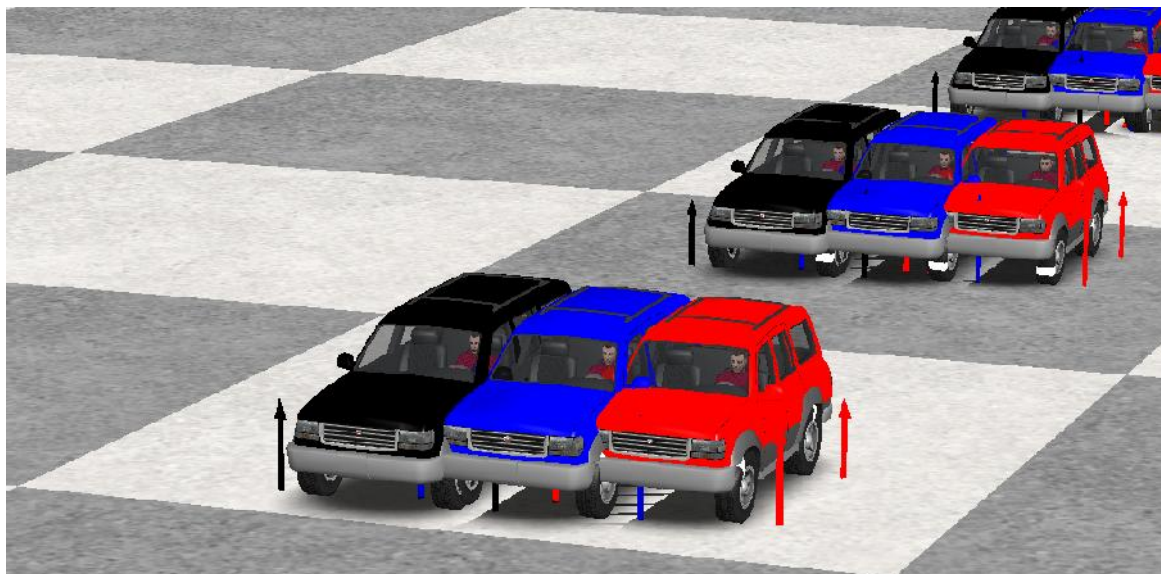
		Vozilo 7.1 (FWD)	Vozilo 7.2 (RWD)	Vozilo 7.3 (4WD)
Vršno VO ubrzanja	s	0,721	0,748	0,738
			3,61%	2,30%
Vršno VO odziva kutne brzine	s	0,376	0,379	0,378
			0,79%	0,53%
VO za 90 % ubrzanja	s	0,416	0,427	0,424
			2,58%	1,89%
VO za 90 % kutne brzine	s	0,164	0,167	0,167
			1,80%	1,80%
Prebačaj - ubrzanje		7,22%	7,36%	7,47%
			1,93%	3,32%
Prebačaj - kutna brzina		28,38%	28,47%	29,23%
			0,31%	2,90%

7.2.3. Zaključak ispitivanja bojnog prijelaznog odziva

Ponašanje vozila u simulacijama ove ispitne procedure odlikovano je i sukladno proučavanoj literaturi. U ovoj simulaciji je povećanje parametara uzdužnog nagiba osi kotača, međuosovinskog razmaka i krutosti opruga, utjecalo na poboljšanje promatranih karakteristika. Rezultat toga je poboljšana upravljivost. Smanjenje vrijednosti bojnog nagiba kotača te skretanje stražnjih kotača u istom smjeru kao i prednjih je također doprinijelo poboljšanju upravljivosti. Vozilo s vozačem, suvozačem te 2 putnika straga pokazalo se kao najbolje u ovoj simulaciji. Promjena vrste pogona u pogon na stražnje kotače imala je pozitivan utjecaj na dio karakteristika pa tako i na upravljivost.

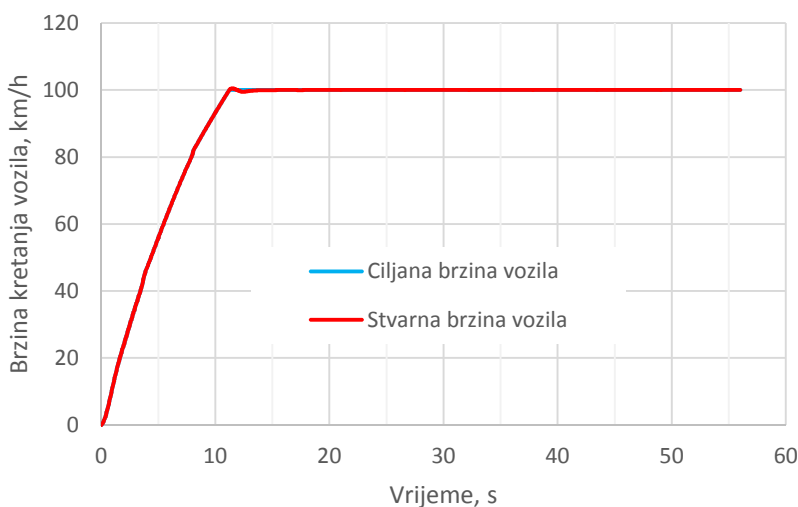
7.3. Simulacija procedure ISO 13674-1:2010 Test krivudanjem

7.3.1. Provedba simulacije procedure ISO 13674-1:2010

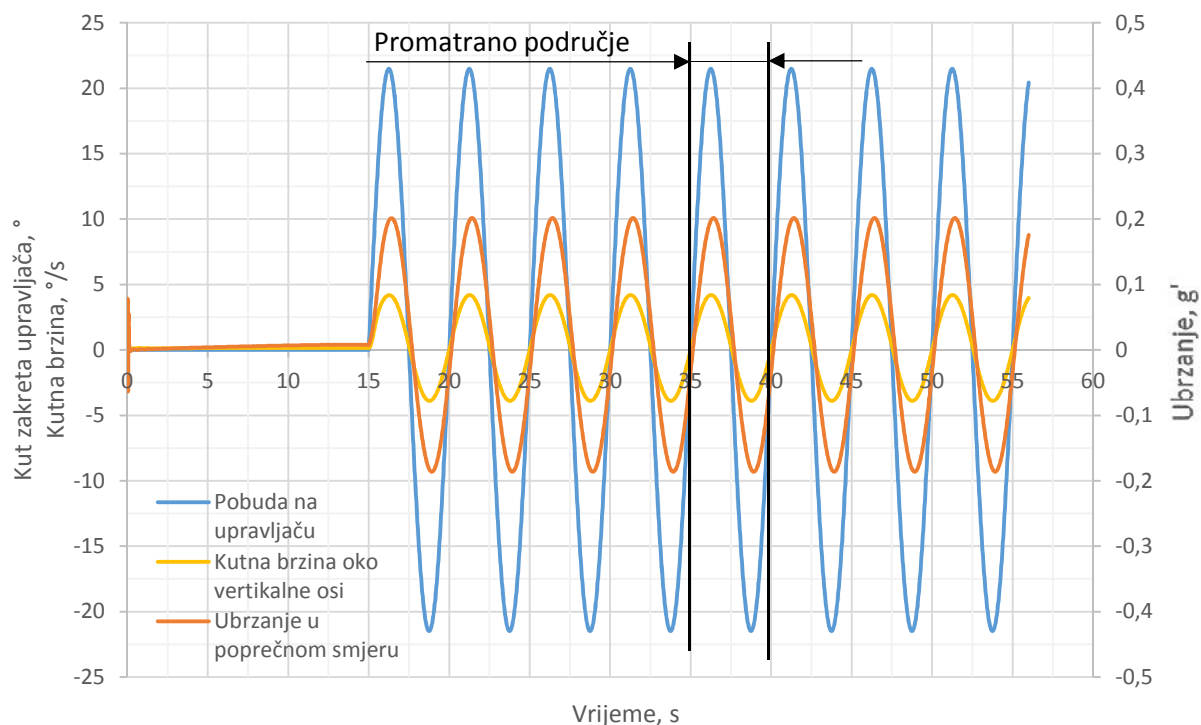


Slika 75. Simulacija ispitne procedure ISO 13674-1:2010 Test krivudanjem

Simulacija ispitne procedure testa krivudanja provedena je sukladno normi. Vozilo ubrzava do 100 km/h, te potom slijedi pobuda upravljača. Brzina vozila održana je konstantnom kroz cijelu ispitnu proceduru (slika 76.). Odabrana je sinusoidna pobuda volana, kako je i preporučeno normom, trajanja 8 ciklusa i frekvencije 0,2 Hz. Iznos zakreta volana jednak je vrijednosti kuta zakreta za koju se postiže ubrzanje vozila u poprečnom smjeru od 2 m/s^2 (slika 77). Radi lakšeg očitavanja rezultata promatrat će se samo peti ciklus sinusoide tj. pobuda upravljača između 35 i 40 s (pod pretpostavkom da su se u petom ciklusu ustalile promjene između krivulja histeresa). Norma propisuje da je potrebno provesti ispitivanje za vozilo s opterećenjem između minimalnog i maksimalnog opterećenja prema normi ISO 15037-1:2006 [13]. Kako je jedan od parametara i razmještaj tereta/putnika, ovdje su provedene simulacije s praznim vozilima (pod pretpostavkom da opterećenje vozila neće utjecati na usporedbu utjecaja pojedinih vrijednosti parametara vozila na promatrane karakteristike).



Slika 76. Brzina kretanja vozila tijekom provedbe simulacije procedure ISO 13674-1:2010



Slika 77. Primjer rezultata vozila sa sinusoidnom pobudom volana i promjena bojnog ubrzanja i kutne brzine oko vertikalne osi

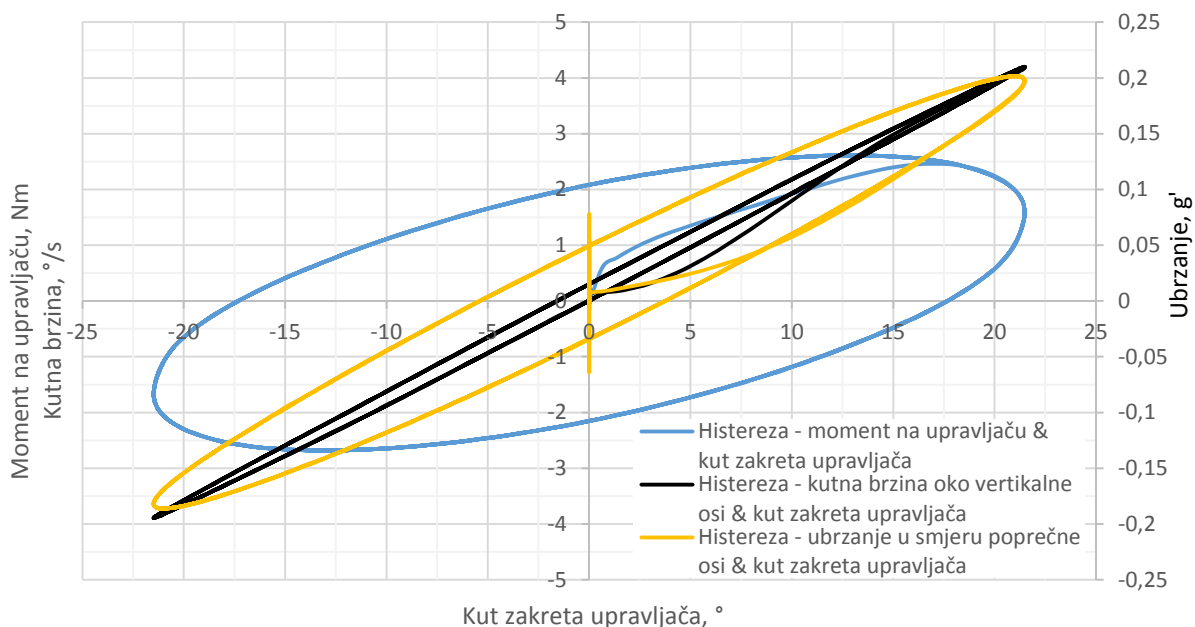
7.3.1. Rezultati simulacije – ISO 13674-1:2010

Prema normi [19] (opisanoj u poglavlju 2.5) rezultati ispitivanja se očitavaju sa dijagrama histereza. Stoga su na slikama 78. i 79. prikazani dijagrami krivulja histereza za izvorno vozilo u CarSim-u (vozila 1.1, 2.1, 3.1 itd.). Za ostala vozila ne mogu se prikazati dijagrami, nego su rezultati očitani sukladno normi (slika 14.) i prikazani tablicom. Norma propisuje očitavanje 21 karakteristike, no u ovom radu su očitane i prikazane ove:

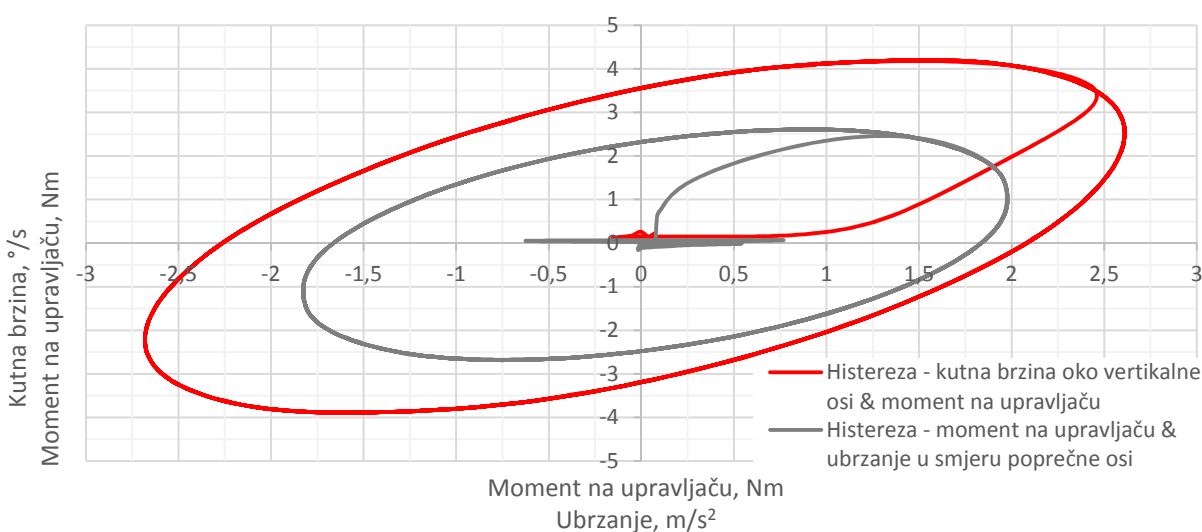
- iz dijagrama histereze momenta na upravljaču i kuta zakreta upravljača:
 - krutost upravljanja (engl. *Steering stiffness*) – predstavlja prosječni gradijent krivulje preko opsega $\pm x$, pri čemu je x jednak 10 % vršnog kuta zakreta upravljača,
 - trenje upravljanja (engl. *Steering friction*) – predstavlja visinu histereze pri kutu zakreta upravljača jednakom nuli,
 - histereza kuta zakretanja (engl. *Angle hysteresis*) – predstavlja širinu histereze pri kutnoj brzini jednakoj nuli,
- iz dijagrama kutne brzine oko vertikalne osi i kuta zakreta upravljača:
 - porast odziva kutne brzine oko vertikalne osi (engl. *Yaw velocity response gain*) – predstavlja prosječni gradijent krivulje preko opsega $\pm x$, pri čemu je x jednak 20 % vršnog kuta zakreta upravljača,
- iz dijagrama histereze ubrzanja u poprečnom smjeru i kuta zakreta upravljača:
 - osjetljivost upravljanja (engl. *Steering sensitivity*) – očitava se kao prosječni gradijent krivulje preko opsega $\pm x$, pri čemu je x jednak 20 % vršnog kuta zakreta upravljača,

- mrtvo područje je ubrzanja u poprečnom smjeru (engl. *Lateral acceleration deadband*) – predstavlja visinu histereze pri kutu zakreta upravljača jednakom nuli,
- mrtvo područje je kut zakreta upravljača (engl. *Angle deadband*) – predstavlja širinu histereze pri ubrzanju jednakom nuli.

Prema proučavanju literature [1],[2],[3],[36],[37],[38] može se zaključiti da karakteristike koje se odnose na gradijent, za poboljšanje upravljivosti generalno trebaju rasti. Karakteristike koje predstavljaju raspon histereze trebaju padati, tj. trebaju biti što manje. Sukladno ovim pretpostavkama u idućim poglavljima, plavom i crvenom bojom, su označena polja u tablicama za svaki pojedini parametar. Također poklapanja numeričkih vrijednosti pojedinih karakteristika nisu uvijek u skladu s navedenom literaturom, zbog različitih pobuda upravljača, različitog vozila ili različitih parametara vozila koji se utjecaj promatra. Iako se numeričke vrijednosti ne poklapaju uvijek, kretanja vrijednosti karakteristika svih vozila su u skladu s očekivanjima i proučavanom literaturom.



Slika 78. Primjer 1 - histereza za izvorno vozilo



Slika 79. Primjer 2 - histereza za izvorno vozilo

7.3.1.1. Bo ni nagib kota α – ISO 13674-1:2010

U tablici 32. prikazane su očitane karakteristike krivulja histerezi navedenih u poglavlju 7.3.1. Za pojedine karakteristike u tablici vrijednosti ispod 1 % razlike u odnosu na izvorno vozilo su zanemarive, tj. smatra se da ovaj parametar nema utjecaja na te karakteristike. Osjetljivost upravljanja je blago porasla s smanjenjem bojnog nagiba kota α prema negativnom nagibu. Mrtvo područje ubrzanja je također poraslo što je i u skladu s proučavanom literaturom navedenom u poglavlju 7.3.1. Na temelju prikazanih rezultata ne može se donijeti zaključak o utjecaju na upravljivost.

Tablica 32. Utjecaj promjene bojnog nagiba kota α na promatrane karakteristike u ispitnoj proceduri ISO 13674-1:2010

		Vozilo 1.1 (+2°)	Vozilo 1.2 (0°)	Vozilo 1.3 (-2°)
Krutost upravljanja	Nm/°	0,07324	0,07313	0,07267
			-0,15%	-0,78%
Trenje upravljanja	Nm	4,23583	4,23781	4,23341
			0,05%	-0,06%
Histereza kuta zakretanja	°	34,96650	34,99780	35,02910
			0,09%	0,18%
Porast odziva kutne brzine	1/s	0,18931	0,19260	0,19603
			1,74%	3,55%
Osjetljivost upravljanja	m/s ² /°	0,00892	0,00906	0,00921
			1,58%	3,23%
Mrtvo područje ubrzanja	m/s ²	0,81801	0,83698	0,85650
			2,32%	4,71%
Mrtvo područje kuta zakreta upr.	°	9,1562	9,2089	9,2881
			0,58%	1,44%

7.3.1.2. Uzdužni nagib osi zakretanja kota α – ISO 13674-1:2010

Kao što je opisano u poglavlju 4.3.2 ovaj parametar utječe na povratne sile na kotaču, tj. na moment na upravljaču. Pri smanjenju nagiba osi moment se smanjuje, a smanjuje se i kut zakreta upravljača. Zbog navedenog u tablici 33. krutost upravljanja opada (smanjuje se moment na upravljaču) sa smanjenjem nagiba dok osjetljivost raste (kut zakreta upravljača također opada). U skladu s proučavanom literaturom navedenom u poglavlju 7.3.1. smanjenjem krutosti upravljanja raste histereza kuta zakretanja, a s rastom osjetljivosti raste i mrtvo područje ubrzanja. Obje veličine predstavljaju raspon histereza i njihov rast negativno utječe na upravljivost. Trenje upravljanja također opada s smanjenjem uzdužnoga nagiba osi. Razlog tomu može biti već spomenuto smanjenje momenta na upravljaču, tj. pad otpora. Karakteristiku mrtvo područje kuta zakreta upravljača nije bilo moguće očitati zbog prevelikih oscilacija krivulja histereze ubrzanje u poprečnom smjeru i kuta zakreta upravljača. Smanjenje uzdužnog nagiba osi zakretanja kota α utjecalo je na više promatranih karakteristika u pozitivnom smjeru, tj. na više karakteristika koje su dovele do poboljšanja upravljivosti.

Tablica 33. . Utjecaj promjene uzdužnog nagiba osi kota a na promatrane karakteristike u ispitnoj proceduri ISO 13674-1:2010

		Vozilo 2.1 (9,5°)	Vozilo 2.2 (5°)	Vozilo 2.3 (0°)	Vozilo 2.4 (15°)
Krutost upravljanja	Nm/°	0,07324	0,05600	0,03733	0,08400
			-23,5%	-49,0%	14,7%
Trenje upravljanja	Nm	4,23583	3,59000	2,74000	4,93000
			-15,2%	-35,3%	16,4%
Histereza kuta zakretanja	°	34,96650	36,24000	37,12000	34,46000
			3,6%	6,2%	-1,4%
Porast odziva kutne brzine	1/s	0,18931	0,20930	0,23720	0,17390
			10,6%	25,3%	-8,1%
Osjetljivost upravljanja	m/s ² /°	0,00892	0,00987	0,01101	0,00792
			10,7%	23,4%	-11,2%
Mrtvo područje ubrzanja	m/s ²	0,81801	0,93555	1,10913	0,67176
			14,4%	35,6%	-17,9%
Mrtvo područje kuta zakreta upravljača	°	₋₂₀	-	-	-

7.3.1.3. Me uosovinski razmak – ISO 13674-1:2010

Tablica 34. Utjecaj promjene me uosovinskog razmaka na promatrane karakteristike u ispitnoj proceduri ISO 13674-1:2010

		Vozilo 3.1 (2600)	Vozilo 3.2 (2210)	Vozilo 3.3 (2405)	Vozilo 3.4 (2795)	Vozilo 3.5 (2990)
Krutost upravljanja	Nm/°	0,07324	0,07753	0,07540	0,07110	0,06902
			5,9%	2,9%	-2,9%	-5,8%
Trenje upravljanja	Nm	4,23583	4,31558	4,27963	4,18723	4,13574
			1,9%	1,0%	-1,1%	-2,4%
Histereza kuta zakretanja	°	34,96650	34,63480	34,80940	35,13790	35,27680
			-0,9%	-0,4%	0,5%	0,9%
Porast odziva kutne brzine	1/s	0,18931	0,19669	0,19305	0,18555	0,18183
			3,9%	2,0%	-2,0%	-4,0%
Osjetljivost upravljanja	m/s ² /°	0,00892	0,00919	0,00906	0,00877	0,00861
			3,0%	1,6%	-1,7%	-3,5%
Mrtvo područje ubrzanja	m/s ²	0,81801	0,91526	0,86396	0,77616	0,73790
			11,9%	5,6%	-5,1%	-9,8%
Mrtvo područje kuta zakreta upravljača	°	9,1562	9,8685	9,4731	8,8382	8,5731
			7,8%	3,5%	-3,5%	-6,4%

²⁰ Zbog prevelikih oscilacija krivulje histereze ovaj podatak nije bilo mogu e precizno o itati.

Tablica 34. prikazuje vrijednosti promatranih karakteristika za parametar me uosovinski razmak. Za pojedine karakteristike u tablici vrijednosti ispod 1 % razlike u odnosu na izvorno vozilo su zanemarive. Ipak može se uočiti tendencija pada histereze kuta zakretanja sa smanjenjem me uosovinskog razmaka, te povećanja krutosti upravljanja što je u skladu s proučavanom literaturom navedenom u poglavlju 7.3.1. Smanjenjem me uosovinskog razmaka povećavaju se skoro svi rasponi krivulja histereza (s izuzetkom karakteristike histereza kuta zakretanja). Razlog tome je manja stabilnost vozila s manjim me uosovinskim razmakom, odnosno veća okretnost što dobro utječe na krutost i osjetljivost upravljanja. To su jedne od najvažnijih karakteristika u ovoj ispitnoj proceduri stoga slijedi zaključak da je smanjenje me uosovinskog razmaka pozitivno utjecalo na upravljivost.

7.3.1.4. Razmještaj tereta/putnika u vozilu – ISO 13674-1:2010

Slično kao u procedurama dvostruke izmjene pravca i ispitivanja bojnog prijelaznog odziva ovaj parametar i u ovoj ispitnoj proceduri utjecao na oscilaciju pojedinih karakteristika, što treba uzeti u obzir kod interpretacije rezultata. Iz istog razloga karakteristiku mrtvo područje kuta zakreta upravljača nije bilo moguće očitati iz dijagrama histereza. Razlike u odnosu na druga vozila manje od 1 %, kao i u prethodnim poglavljima, smatraju se zanemarivim. Zbog prevelikog rasipanja ili nedostatka rezultata (vidi tablicu 35.) ne može se donijeti zaključak o utjecaju ovog parametra na upravljivost u ovoj ispitnoj proceduri.

Tablica 35. Utjecaj promjene razmještaja tereta/putnika u vozilu na promatrane karakteristike u ispitnoj proceduri ISO 13674-1:2010

		Vozilo 4.1 (4xP)	Vozilo 4.2 (S+B(150kg))	Vozilo 4.3 (B(225kg))	Vozilo 4.4 (B(150kg) +K(75kg))	Vozilo 4.5 (S+K(150kg))
Krutost upravljanja	Nm/°	0,07506	0,07547	0,07372	0,07133	0,07129
			0,6%	-1,8%	-5,0%	-5,0%
Trenje upravljanja	Nm	4,48385	4,37790	4,30450	4,29335	4,40330
			-2,4%	-4,0%	-4,2%	-1,8%
Histereza kuta zakretanja	°	35,23350	35,01650	35,03940	35,36580	35,64550
			-0,6%	-0,6%	0,4%	1,2%
Porast odziva kutne brzine	1/s	0,17714	0,18238	0,18051	0,17915	0,17433
			3,0%	1,9%	1,1%	-1,6%
Osjetljivost upravljanja	m/s ² /°	0,00843	0,00842	0,00854	0,00831	0,00826
			-0,2%	1,3%	-1,5%	-2,1%
Mrtvo područje ubrzanja	m/s ²	0,71624	0,76646	0,84332	0,78027	0,65497
			7,0%	17,7%	8,9%	-8,6%
Mrtvo područje kuta zakreta upravljača	°	²¹	-	-	-	-

²¹ Zbog prevelikih oscilacija krivulje histereze ovaj podatak nije bilo moguće precizno očitati.

7.3.1.5. Upravljanje prednjim / svim kota ima – ISO 13674-1:2010

Kretanje karakteristika za ovaj parametar suprotno je prou avanoj literaturi navedenoj u poglavlju 7.3.1. Vozila 5.2 i 5.3, sa skretanjem kota a u istu stranu kao i prednji, imaju pad krutosti upravljanja, a istovremeno im pada i histereza kuta zakretanja (vidi tablicu 36.). Sli no vrijedi za ista vozila za karakteristike osjetljivost upravljanja i mrtvo podru je ubrzanja. Budu i da su postoci promjene u odnosu na izvorno vozilo relativno mali za te karakteristike može se re i da su ovi rezultati i dalje ispravni. U prilog tome ide i da su se u prou avanoj literaturi ispitivanja ili simulacije provodile s vozilima s konvencionalnim upravljanjem prednjim kota ima. Zbog toga nije mogu e direktno usporediti kretanja karakteristika, budu i da ovaj parametar uvelike mijenja dinamiku vozila. Kod vozila 5.4 i 5.5, sa skretanjem stražnjih kota a u suprotnu stranu od prednjih, kretanje tih karakteristika prati prou avanu literaturu (tablica 36.). Promjena parametara na tim vozilima je pozitivno utjecala na krutost i osjetljivost upravljanja. Istodobno su porasla mrtva podru ja ubrzanja i mrtvo podru je kuta zakreta upravlja a. Razlog tomu su ve i preba aji ubrzanja [1] u popre nom smjeru za vozila s skretanjem stražnjih kota a u suprotnu stranu od prednjih. Prema [1] za ta vozila karakteristi an je tako er brzi rast kutne brzine oko vertikalne osi. Posljedica toga je da u tablici 36. karakteristika porast odziva kutne brzine porasla u velikim postocima u odnosu na izvorno vozilo. Zaklju ak je da je u ovoj ispitnoj proceduri skretanje stražnjih kota a u suprotnu stranu od prednjih imalo bolji utjecaj na upravljivost od skretanju u istu stranu. Kutovi zakreta stražnjih kota a kre u se do maksimalnih $0,9^\circ$ što je u preporu enim granicama iz literature [1].

Tablica 36. Utjecaj upravljanja svih kota a na promatrane karakteristike u ispitnoj proceduri ISO 13674-1:2010

		Vozilo 5.1 (FWS)	Vozilo 5.2 (+30)	Vozilo 5.3 (+20)	Vozilo 5.4 (-30)	Vozilo 5.5 (-20)
Krutost upravljanja	Nm/°	0,07324	0,06496	0,07303	0,12619	0,11530
			-11,3%	-0,3%	72,3%	57,4%
Trenje upravljanja	Nm	4,23583	3,90319	4,09443	5,42528	5,21365
			-7,9%	-3,3%	28,1%	23,1%
Histereza kuta zakretanja	°	34,96650	35,17290	34,50900	30,83700	31,69160
			0,6%	-1,3%	-11,8%	-9,4%
Porast odziva kutne brzine	1/s	0,18931	0,15826	0,17667	0,37432	0,32248
			-16,4%	-6,7%	97,7%	70,3%
Osjetljivost upravljanja	m/s ² /°	0,00892	0,00744	0,00825	0,01695	0,01459
			-16,6%	-7,5%	89,9%	63,5%
Mrtvo područje ubrzanja	m/s ²	0,81801	0,68258	0,82819	2,46572	2,02392
			-16,6%	1,2%	201,4%	147,4%
Mrtvo područje kuta zakreta upravljača	°	9,1296	9,1521	9,9432	13,9670	13,3775
			0,2%	8,9%	53,0%	46,5%

7.3.1.6. Krutost opruga – ISO 13674-1:2010

Tablica 37. prikazuje kretanje promatranih karakteristika u ovoj ispitnoj proceduri za parametar krutost opruga. Sva kretanja su u skladu s o ekivanjima i prou avanom literaturom

navedenom u poglavlju 7.3.1. Razlike u odnosu na izorno vozilo za karakteristiku trenje upravljanja manje su od 1 % stoga se utjecaj ovog parametra na nju smatra zanemarivim. Povećanjem krutosti opruga otkriveno je porasla krutost upravljanja i osjetljivost upravljanja. Razlog tomu je i potreban nešto manji kut zakreta upravljača za vozila 6.4 i 6.5, što se moglo primijetiti u prethodno izvedenim simulacijama. Histereza kuta za vozilo 6.4 manja je od 1 %, ali je vidljiva tendencija pada raspona histereze s rastom krutosti opruga. Negativan utjecaj rasta krutosti imao je na mrtvo područje ubrzanja u poprečnom smjeru i kuta zakreta upravljača. Zbog sporijeg rasta ubrzanja i manjeg prebacivanja rasponi su veći. Kod vozila s manjom krutosti opruga brzina brzo raste pa brže prijeđe to kritično mrtvo područje i postiže višu vrijednost pa stoga je taj raspon manji. Ipak povećanje krutost opruga doprinijelo je poboljšanju upravljivosti u ovoj ispitnoj proceduri.

Tablica 37. Utjecaj promjene krutosti opruga na promatrane karakteristike u ispitnoj proceduri ISO 13674-1:2010

		Vozilo 6.1 (130/40)	Vozilo 6.2 (100/30)	Vozilo 6.3 (65/20)	Vozilo 6.4 (160/50)	Vozilo 6.5 (195/60)
Krutost upravljanja	Nm/°	0,07324	0,07062	0,06632	0,07514	0,07676
			-3,6%	-9,4%	2,6%	4,8%
Trenje upravljanja	Nm	4,23583	4,23110	4,23892	4,24336	4,25104
			-0,1%	0,1%	0,2%	0,4%
Histereza kuta zakretanja	°	34,96650	35,36970	36,05990	34,69800	34,47380
			1,2%	3,1%	-0,8%	-1,4%
Porast odziva kutne brzine	1/s	0,18931	0,18570	0,18012	0,19204	0,19451
			-1,9%	-4,9%	1,4%	2,7%
Osjetljivost upravljanja	m/s ² /°	0,00892	0,00880	0,00862	0,00902	0,00910
			-1,4%	-3,4%	1,0%	2,0%
Mrtvo područje ubrzanja	m/s ²	0,81801	0,75466	0,64262	0,86175	0,89878
			-7,7%	-21,4%	5,3%	9,9%
Mrtvo područje kuta zakreta upravljača	°	9,1562	8,5750	7,4882	9,5248	9,8142
			-6,3%	-18,2%	4,0%	7,2%

7.3.1.7. Vrsta pogona – ISO 13674-1:2010

U ovoj ispitnoj proceduri parametar vrsta pogona, pri uvjetima ispitivanja prikazanim u ovom radu, na promatrane karakteristike nije utjecao tj. razlike u odnosu na izvorno vozilo su manje od 1 %.

7.3.2. Zaključak testa krivudanja

Ponašanje vozila u simulacijama ove ispitne procedure sukladno je proučavanoj literaturi. Vrsta pogona nije imala utjecaja u ovoj simulaciji dok se za parametre razmještaj tereta / putnika u vozilu i bojni nagib kota vozila nije mogao donijeti zaključak. Smanjenje vrijednosti parametara, mehanoskopskog razmaka i uzdužnog nagiba osi zakretanja kota odnosno povećanje krutosti opruga, doprinijelo je poboljšanju upravljivosti. Skretanje stražnjih kota a u suprotnu stranu kao i prednjih značajno je poboljšalo karakteristike vozila.

7.4. Utjecaj parametara vozila na upravljivost u standardnim ispitnim procedurama

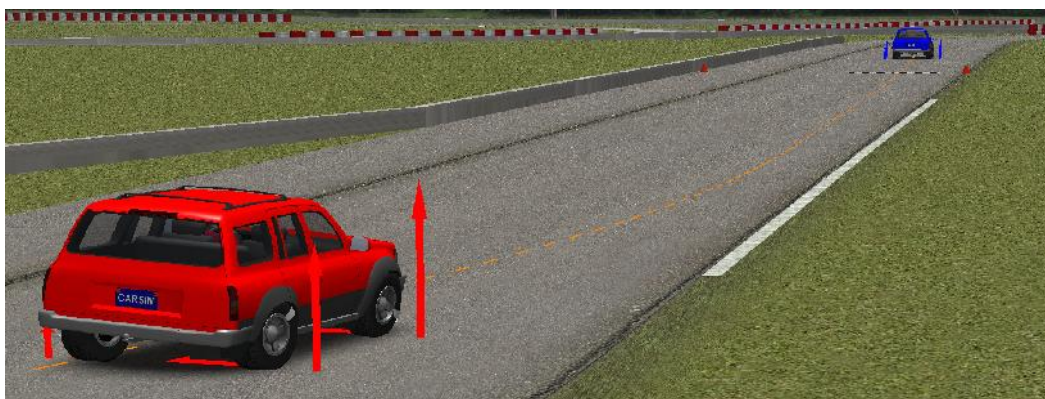
U tablici 38. sumirani su rezultati simulacija triju ispitnih procedura u poglavlju 7. Kva i ca u ku icama ozna uje da je pove anje/smanjenje tog parametra u odre enoj proceduri pozitivno utjecalo na promatrane karakteristike tj. na upravljivost. Tamo gdje kva i ca nedostaje zna i da se kretanje vrijednosti parametra u tom smjeru loše odrazilo na upravljivost. Za parametre koje nije bilo mogu e donijeti zaklju ak o utjecaju na upravljivost zbog nepotpunih rezultata ili zbog toga jer nisu imali utjecaj na promatrane karakteristike u ku icama je stavljen minus. Kod parametra razmještaj tereta/putnika u vozilu, plus ozna ava da je navedena kombinacija poboljšala upravljivost, odnosno minus da je pogoršana upravljivost. Brojevi 4.1 i 4.4 su oznake vozila iji razmještaj sveukupno gledano u svim ispitnim procedurama najmanje/najviše utje e na pogoršanje upravljivosti. U ovom se radu striktno promatrala usporedba pojedinih vrijednosti parametra kako bi se dobilo uvid u kojem smjeru je bolje i i pri mijenjanju tih parametra. U tablici je to jednozna no i pokazano. Za poboljšanje upravljivosti bo ni nagib kota a i uzdužni nagib osi zakretanja kota a trebaju biti što manji, me uosovinski razmak i krutost opruga što ve a. Upravljanje stražnjim kota ima generalno je bolje utjecalo na ishod ispitnih procedura. Može se povu i paralela izme u tog parametra i parametra me uosovinski razmak gdje vidimo da istovjetno utje u na rezultate. Razlog tomu je što skretanje stražnjih kota a u istu stranu kao i prednjih simulira ve i me uosovinski razmak.

Tablica 38. Suma ponašanja parametara u razmatranim ispitnim procedurama

		Dvostruka izmjena pravca	Ispitivanje bočnog prijelaznog odziva	Test krivudanjem	Σ
		ISO 3888-1:1999	ISO 7401:2011	ISO 13674-1:2010	
Bočni nagib kotača	+			-	
	-	✓	✓	-	✓
Uzdužni nagib osi zakretanja kotača	+		✓		
	-	✓		✓	✓
Međuosovinski razmak	+	✓	✓		✓
	-			✓	
Razmještaj tereta/putnika u vozilu	+	V + B (225 kg)	V + S + 2 P	-	4.1
	-	V + B (150 kg) + K(75 kg)	V + S + K(150 kg)	-	4.2
Upravljanjem svim kotačima	+	✓	✓		✓
	-			✓	
Krutost opruga	+	✓	✓	✓	✓
	-				
Vrsta pogona		-	RWD	-	-

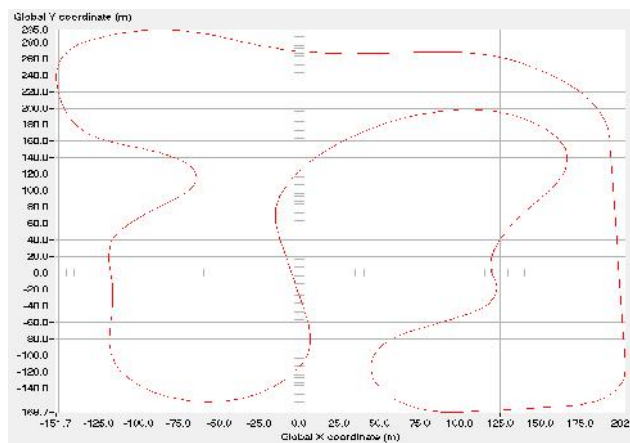
Parametar vrsta pogona u ovim ispitnim procedurama pri zadanim uvjetima nije imao veliki utjecaj na rezultate tj. na upravljivost. Razlog tome je što ovaj parametar najprije ima najveći i utjecaj na ostvarivanje performansi vozila te stabilnost. Kod ekstremnijih uvjeta simulacija (veća brzina kretanja vozila, skliska podloga, veći i kut zakreta upravljača) vjerojatno bi se i kod ovog parametra pojavile veće razlike, no to u ovom radu nije promatrano.

7.5. Simulacija na trkačkoj stazi



Slika 80. Vozila A-1 i B-1 u ciljnoj ravnini

Simulacija na trkačkoj stazi napravljena je kako bi se dobila potvrda utjecaja parametara na upravljivost zaključena iz provedenih standardnih ispitnih procedura. Iako je ispitivanje na trkačkoj stazi ekstremno, na njoj su razlike između vozila najviše do 10% i do 20% izražaja. Na osnovu provedenih simulacija i prethodno pokazanih rezultata izrađena su dodatna 4 vozila (vidi tablica 38.). Parametar vrsta pogona ovdje se neće razmatrati zbog malog utjecaja na prethodne ispitne procedure. Dodatno bi taj parametar u ovoj simulaciji zbog boljeg ostvarivanja performansi pojedinog pogona dao prednost jednom od vozila, koja bi bila nedostižna. Sva vozila će zbog toga imati pogon na prednje kotače kao i izvorno vozilo. U tablici 39. prikazani su parametri vozila u ovoj simulaciji. Vozila s oznakama A označuju vozilo s vrijednostima parametara koji su se pokazalo najboljima u prethodnim simulacijama, a B najgorim. Također broj 1 u nazivu vozila označava da se simulacija izvodi s praznim vozilom, a broj 2 da je vozilo opterećeno masom od 300 kg, raspoređeno prema tablici. Simulacija je provedena na kružnoj trkačkoj stazi duljine 2274 m (slika 81.).



Slika 81. Definirana trkačka staza u izborniku CarSim-a

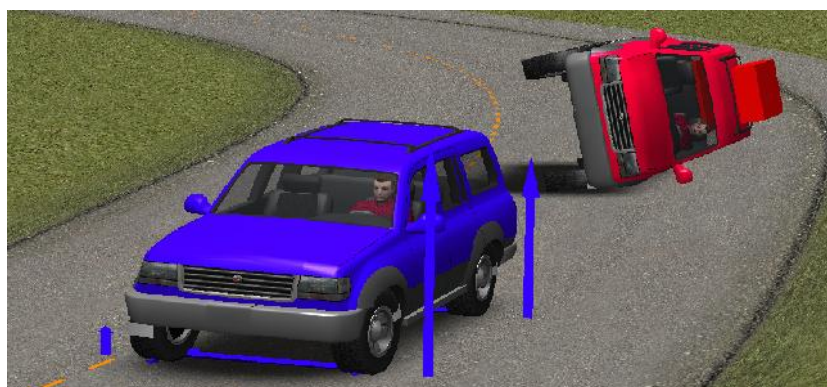
Tablica 39. Vozila u simulaciji vožnje na trka oj stazi

	Vozilo A-1	Vozilo B-1	Vozilo A-2	Vozilo B-2
Bočni nagib kotača	-2	+2	-2	+2
Uzdužni nagib osi zakretanja kotača	0	15	0	15
Međuosovinski razmak	2990	2210	2990	2210
Razmještaj tereta/putnika u vozilu	-	-	V+S+2P	V+B(150kg)+K(75kg)
Upravljanjem svim kotačima	+30	-30	+30	-30
Krutost opruga	195/60	65/20	195/60	65/20
Vrsta pogona	FWD	FWD	FWD	FWD

Vozilo A-1 o ekivano je prošlo stazom u najkra em vremenskom roku (vidi tablicu 40.). Vozilo B-1 je u zaostatku od 3,65 s što se vidi i na slici 80. Vozilo A-2, koje je bilo optere eno masom s najpovoljnijim razmještajem, zaostalo je samo 1,84 s za vozilom A-1. To je manji zaostatak od praznog vozila B-1 s najgorim vrijednostima parametara. Razlog tomu je ve i osovinski razmak A vozila koji mu stoga omogu ava i bolji razmještaj tereta i pomak težišta prema središtu automobila. Vozilo B-2 neuspješno je završilo ovu simulaciju. Kod brzine vozila od 100 km/h, pri ulasku u prvi zavoј, došlo je do naginjanja vozila te s usporavanjem na 90 km/h i do gubitka stabilnost tj. prevrtanja (vidi sliku 82.). Kra i osovinski razmak, s razmještajem tereta koje je dovelo do povišenja težišta u kombinaciji s mekanim oprugama imalo je za posljedicu ovakav ishod. Tako er tome nije pripomoglo i brzi rast i preba aj kutne brzine oko vertikalne osi zbog upravljanja stražnjih kota a u suprotnu stranu od prednjih.

Tablica 40. Simulacija na trka oj stazi – prolazna vremena

	Vozilo A-1	Vozilo B-1	Vozilo A-2	Vozilo B-2
Vrijeme	97,79 s	101,44 s	99,63 s	-
Zaostatak		3,65 s	1,84 s	-

**Slika 82. Prevrtanje vozila B-2**

8. ZAKLJUČAK

U ovom radu provedena je analiza utjecaja promjene parametara za tri standardne ispitne procedure. Simulirane su ispitne procedure:

1. dvostruka izmjena pravca gdje se analizira situacija iz svakodnevne vožnje na ispitnom poligonu,
2. ispitivanje bočnog prijelaznog odziva gdje se analizira odziv poprečne i vertikalne dinamike vozila na pobudu upravljača,
3. test krivudanjem gdje se analizira dinamika vozila pri pobudi na upravljaču kako bi se dobila ocjena upravljivosti vozila u središnjoj osi.

Promatrani su rezultati na kojima i kako to zahtijevaju pravilnici. Neki od rezultata se lako očitavaju izravno iz dijagrama dok je za dio rezultata bilo potrebno provesti obradu rezultata. Iz rezultata se može zaključiti da je smanjenje vrijednosti parametara, bočnog nagiba kotača i uzdužnog nagiba osi zakretanja kotača odnosno povećanje vrijednosti parametara, mešovinskog razmaka i krutosti opruga, doprinijelo poboljšanju upravljivosti. Skretanje stražnjih kotača u suprotnu stranu kao i prednjih značajno je poboljšalo karakteristike vozila, a najbolji razmještaj dodatne mase u vozilu je onaj koji najmanje utječe na promjene težišta vozila tj. četiri putnika u vozilu.

Također je provedena simulacija kretanja vozila trkačom stazom. Rezultati su otkriveni odnosno potvrđeni su doneseni zaključci o ponašanju pojedinih parametara u ispitnim procedurama.

LITERATURA

- [1] Heissing, Ersoy, Chassis Handbook – Fundamentals, Driving Dynamics, Components, Mechatronics-Perspectives, ATZ, 2011
- [2] Chevatco, Vladimir, Exploration of steering feel, Degree project in vehicle engineering, first level KTH Royal Institute of technology, Stochholm, Sweden, 2015
- [3] Philip Harnett, Objective Methods for the Assessment of Passenger Car Steering Quality, PhD, School of Engineering, Cranfield University; 2002
- [4] Tehnika motornih vozila, 2. neizmjenjeno izdanje, Pu ko otvoreno u ilište Zagreb, Hrvatska obrtni ka komora; Zagreb, 2004
- [5] The Car Guide, <http://www.guideautoweb.com/en/articles/40540/power-steering-a-brief-history/>, datum pristupa: 2.10.2017.
- [6] David A Crolla, Encyclopedia of automotive engineering, John Wiley & Sons Inc 2015
- [7] Reimpell, Stoll, Betzler, The Automotive Chassis: Engineering Principles, Butterworth-Heinemann, Oxford, 2001
- [8] ISO/TC 22/SC 33 *Vehicle Dynamics and chassis components*, <https://www.iso.org/committee/5383785/x/catalogue/>
- [9] AB Dynamics <http://www.abd.uk.com/>, datum pristupa: 2.10.2017.
- [10] Teknikens Värld, <http://teknikensvarld.se/this-is-how-the-new-jeep-grand-herokee-2014-handles-the-moose-test-117095/>, datum pristupa: 4.10.2017.
- [11] Motortrend, <http://st.motortrend.com/uploads/sites/5/2015/04/BMW-Teen-Drivers-Ed-Double-Lane-Change.jpg?interpolation=lanczos-none&fit=around%7C660%3A413>, datum pristupa: 4.10.2017.
- [12] ISO 3888-1:1999 Passenger cars – Test track for a severe lane-change manoeuvre – Part 1: Double Lane Change
- [13] ISO 15037-1:2006 Road vehicles – Vehicle dynamics test methods – Part 1: General conditions for passenger cars
- [14] Double lane-change measurements according to ISO 3888-1, DEWETRON Ges.m.b.H.
- [15] ISO 3888-2:2011 Passenger cars – Test track for a severe lane-change manoeuvre – Part 2: Obstacle avoidance
- [16] ResearchGate, https://www.researchgate.net/figure/256422117_fig4_Figure-6-ISO-3888-double-lane-change-maneuver-test-track-14, datum pristupa: 5.10.2017.
- [17] ISO 4138:2012 Passenger cars – Steady state circular driving behaviour – Open-loop test methods
- [18] ISO 7401:2011 Road Vehicles – Lateral transient response test methods – Open-loop test methods
- [19] ISO 13674-1:2010 Road vehicles – Test method for the quantification of on-centre handling – Part 1: Weave test
- [20] ISO 7975:2006 Passenger cars – Braking in a turn – Open-loop test method
- [21] ISO 9816:2006 Passenger cars – Power off reaction of a vehicle in a turn – Open loop test method
- [22] ISO 13674-2:2016 Road vehicles – Test method for the quantification of on-centre handling – Part 2: Transition test

- [23] ISO 17288-1:2011 Passenger cars – Free-steer behaviour – Part 1: Steering-release open-loop test method
- [24] ISO 17288-2:2011 Passenger cars – Free-steer behaviour – Part 2: Steering-pulse open-loop test method
- [25] Goran Šagi, Modeli vozila u simulacijama dinamike vozila, Raunalne simulacije u razvoju motora i vozila, predavanja, FSB, Zagreb, 2016/2017
- [26] ISO 8855:2011 Road vehicles – Vehicle dynamics and road-holding ability – Vocabulary
- [27] Dieter Schramm, Manfred Hiller, Roberto Bardini, Vehicle Dynamics, Modeling and Simulation, Springer, 2014.
- [28] CarSim brochure, Mechanical Simulation Corporation, 2014
- [29] Mechanical Simulation, <https://www.carsim.com/products/carsim/>, datum pristupa: 11.10.2017.
- [30] Mechanical Simulation, <https://www.carsim.com/company/customers/carsim.php>, datum pristupa: 12.10.2017.
- [31] Luli, Ormuž, Šagi, Upravljanje vozilom, Motorna vozila, predavanja, FSB, Zagreb, 2015/ 2016
- [32] Tehnika motornih vozila, 30. prepravljeno i nadopunjeno izdanje, Pučko otvoreno učilište Zagreb, Centar za vozila Hrvatske, Hrvatska obrtnička komora, Zagreb, 2013
- [33] Carscoop & Carscoops, <http://www.carscoops.com/2017/03/audi-launches-new-rs5-coupe-with-450-ps.html>, datum pristupa: 15.10.2017.
- [34] Trimemedia, <http://trime.net/nissan-qashqai-solutions/>, datum pristupa: 15.10.2017.
- [35] The Car Connection, <http://www.thecarconnection.com/inventory?make=audi&model=q5&city=boston&state=ma&page=2>, datum pristupa: 15.10.2017.
- [36] Runqing Guo, Zhaojuan Jiang, Lin Yuan, Application of Steering Robot in the Test of Vehicle Dynamic Characteristics, China Automotive Technology and Research Center Dongli District, 2015, Tianjin, P.R. China
- [37] Ir. P. v.d. Linden, Prof. Dr. H. Nijmeijer, Friction and compliance identification in a vehicle's steering system, Technische Universiteit Eindhoven; 2010, Eindhoven
- [38] Rohit Vaidya, P Seshu, G Arora, Study on On-Center Handling Behaviour of a Vehicle; Tata Technologies Limited, Bombay

PRILOZI

I. CD-R disc